

Estudio comparativo de diferentes tipos de fibras naturales para la fabricación de materiales compuestos biodegradables

Trabajo Fin de Grado

Autor: Andrés López Gorría

Tutor: Prof. Dr. D. Carlos Santiuste Romero

Departamento de mecánica de medios continuos y
teoría de estructuras

Leganés
Septiembre 2017



Universidad
Carlos III de Madrid



Índice

1. INTRODUCCIÓN	9
1.1. MOTIVACIÓN	9
1.2. OBJETIVOS	10
1.3. RESUMEN	11
2. ANTECEDENTES	12
2.1. MATERIALES COMPUESTOS	12
2.1.1. FIBRAS TRADICIONALES	12
2.1.2. MATRICES TRADICIONALES	15
2.2. MATERIALES COMPUESTOS BIODEGRADABLES	15
2.2.1. FIBRAS VEGETALES VS FIBRAS TRADICIONALES	16
2.2.1.1. COSTES	16
2.2.1.2. IMPACTO AMBIENTAL	17
2.2.1.3. PROPIEDADES MECANICAS	18
2.2.2. MATRICES BIODEGRADABLES VS MATRICES SINTÉTICAS TRADICIONALES	19
2.3. PROCESOS DE FABRICACIÓN	22
3. PROCESO DE FABRICACIÓN Y ENSAYOS	26
3.1. EQUIPO REQUERIDO PARA LA FABRICACIÓN	27
3.2. ELABORACIÓN DE LÁMINAS DE PLA	29
3.3. ELABORACIÓN DE LÁMINAS DE LINO	33
3.3.1. LÁMINAS DE LINO HILADO MANUALMENTE	34
3.3.2. LÁMINAS DE LINO CON HILADO INDUSTRIAL	35
3.3.3. LÁMINAS DE LINO TEJIDO	36
3.4. ELABORACIÓN DE LÁMINAS DE ESPARTO	36
3.5. MOLDEO POR COMPRESIÓN DE COMPUESTOS CON REFUERZO UNIDIRECCIONAL DE LINO	38
3.6. MOLDEO POR COMPRESIÓN DE COMPUESTOS CON REFUERZO DE LINO TEJIDO	39
3.7. MOLDEO POR COMPRESION DE COMPUESTOS CON REFUERZO DE ESPARTO	40
3.8. ENSAYOS DE TRACCIÓN	42
4. RESULTADOS	43
4.1. REFUERZO DE LINO UNIDIRECCIONAL HILADO INDUSTRIALMENTE	43
4.1.1. PARÁMETRO DE TEMPERATURA	44
4.1.2. PARÁMETRO DE PRESIÓN	44
4.1.3. PARÁMETRO DE COMPOSICIÓN	48



4.1.4. PARÁMETRO NÚMERO DE LÁMINAS DE LINO	62
4.2. REFUERZO DE LINO UNIDIRECCIONAL HILADO MANUALMENTE.....	65
4.3. REFUERZO DE LINO TEJIDO	68
4.4. REFUERZO UNIDIRECCIONAL DE ESPARTO.....	76
4.4.1. TALLOS DE ESPARTO EN BRUTO	76
4.4.2. TALLOS DE ESPARTO MACHACADO.....	78
5. PRESUPUESTO	88
6. CONCLUSIONES	90
7. TRABAJOS FUTUROS	92
8. REFERENCIAS.....	95

Índice de figuras

Figura 1. Motocicleta eléctrica ‘Be.e’ [5], raqueta ‘Artengo TR890’ [6] y guitarra ‘Blackbird El Capitán’ [7].	10
Figura 2. Esquema de proceso de fabricación mediante compresión con placas calefactoras. 26	
Figura 3. Zona de trabajo y equipo utilizado en la fabricación.	27
Figura 4. Dispositivo de control ambiental.	28
Figura 5. Dispositivo para conformar láminas de refuerzo unidireccional.	29
Figura 6. Diagramas tensión-deformación de las probetas de la muestra 1.	45
Figura 7. Representación gráfica de módulo de Young, tensión máxima y deformación de rotura de las probetas de la muestra 1.	45
Figura 8. Diagramas tensión-deformación de las probetas de la muestra 2.	46
Figura 9. Representación gráfica de módulo de Young, tensión máxima y deformación de rotura de las probetas de la muestra 2.	47
Figura 10. Diagramas tensión-deformación de las probetas de la muestra 3.	49
Figura 11. Representación gráfica de módulo de Young, tensión máxima y deformación de rotura de las probetas de la muestra 3.	49
Figura 12. Diagramas tensión-deformación de las probetas de la muestra 4.	50
Figura 13. Representación gráfica de módulo de Young, tensión máxima y deformación de rotura de las probetas de la muestra 4.	51
Figura 14. Diagramas tensión-deformación de las probetas de la muestra 5.	52
Figura 15. Representación gráfica de módulo de Young, tensión máxima y deformación de rotura de las probetas de la muestra 5.	52
Figura 16. Diagramas tensión-deformación de las probetas de la muestra 6.	53
Figura 17. Representación gráfica de módulo de Young, tensión máxima y deformación de rotura de las probetas de la muestra 6.	53
Figura 18. Diagramas de contenido de lino (%) de las probetas de las muestras 1, 3, 4, 5, 6, 7.55	
Figura 19. Diagrama de contenido de lino (%) frente a módulo de Young de las probetas extraídas de las muestras producidas bajo los mismos parámetros excepto composición.	57
Figura 20. Diagrama de contenido de lino (%) frente a tensión máxima de las probetas extraídas de las muestras producidas bajo los mismos parámetros excepto composición.	58
Figura 21. Estado tensional en probeta con refuerzo de fibras unidireccional sometida a sistema de cargas uniaxial [37].	59
Figura 22. Rotura teórica de probeta con refuerzo de fibras unidireccional sometida a sistema de cargas uniaxial paralelo a la dirección de las fibras [37].	59
Figura 23. Modo de fallo de probeta con refuerzo unidireccional extraída de zona central de una muestra genérica.	60

Figura 24. Rotura teórica de probeta con refuerzo de fibras unidireccional sometida a sistema de cargas uniaxial no paralelo a la dirección de las fibras [37].	60
Figura 25. Modo de fallo de probeta con refuerzo unidireccional extraída de los extremos de una muestra genérica.	61
Figura 26. Diagrama de contenido de lino (%) frente a tensión máxima de las probetas de la muestra 3.	61
Figura 27. Diagrama de contenido de lino (%) frente a tensión máxima de las probetas de la muestra 5.	62
Figura 28. Diagramas tensión-deformación de las probetas de la muestra 7.	63
Figura 29. Representación gráfica de módulo de Young, tensión máxima y deformación de rotura de las probetas de la muestra 7.	64
Figura 30. Diagramas tensión-deformación de las probetas de la muestra 8.	67
Figura 31. Representación gráfica de módulo de Young, tensión máxima y deformación de rotura de las probetas de la muestra 8.	67
Figura 32. Diagramas tensión-deformación de las probetas de la muestra 9.	70
Figura 33. Representación gráfica de módulo de Young, tensión máxima y deformación de rotura de las probetas de la muestra 9.	71
Figura 34. Diagrama de contenido de lino (%) de las probetas de la muestra 9.	71
Figura 35. Diagramas tensión-deformación de las probetas de la muestra 10.	72
Figura 36. Representación gráfica de módulo de Young, tensión máxima y deformación de rotura de las probetas de la muestra 10.	73
Figura 37. Diagrama de contenido de lino (%) de las probetas de la muestra 10.	73
Figura38. Probeta extraída de la muestra del compuesto con fibras de esparto en bruto.	77
Figura 39. Diagramas tensión-deformación de las probetas de la muestra 12.	79
Figura 40. Representación gráfica de módulo de Young, tensión máxima y deformación de rotura de las probetas de la muestra 12.	79
Figura 41. Diagrama de contenido de esparto (%) de las probetas de la muestra 12.	80
Figura 42. Diagramas tensión-deformación de las probetas de la muestra 13.	81
Figura 43. Representación gráfica de módulo de Young, tensión máxima y deformación de rotura de las probetas de la muestra 13.	81
Figura 44. Diagrama de contenido de esparto (%) de las probetas de la muestra 13.	82
Figura 45. Diagramas tensión-deformación de las probetas de la muestra 14.	83
Figura 46. Representación gráfica de módulo de Young, tensión máxima y deformación de rotura de las probetas de la muestra 14.	84
Figura 47. Diagrama de contenido de esparto (%) de las probetas de la muestra 14.	84
Figura 48. Diagramas tensión-deformación de probetas extraídas de muestras con distintos tipos de refuerzo.	86

Figura 49. Orientación de las fibras de esparto secado en las muestras que presentan este refuerzo. 87

Índice de tablas

Tabla 1. Clasificación de las fibras tradicionales según su origen [11].	12
Tabla 2. Propiedades de distintos tipos de fibra de carbono [11].	13
Tabla 3. Propiedades de distintos tipos de fibra de vidrio [11].	15
Tabla 4. Coste y producción de distintas fibras vegetales y sintéticas incluidos datos del acero [9].	17
Tabla 5. Tiempo de descomposición de distintos materiales [16].	17
Tabla 6. Propiedades de distintas fibras vegetales [12,17].	18
Tabla 7. Propiedades de distintas fibras vegetales y sintéticas incluidos datos del acero [9, 18].	19
Tabla 8. Propiedades de distintos polímeros biodegradables [17].	21
Tabla 9. Propiedades de distintos polímeros tradicionales [17, 23, 24, 25].	21
Tabla 10. Coste de distintos polímeros [17, 26, 27].	21
Tabla 11. Propiedades mecánicas de distintos materiales compuestos de fibras naturales [17, 30, 31].	25
Tabla 12. Datos estadísticos de las propiedades mecánicas de las probetas de la muestra 1. ...	46
Tabla 13. Datos estadísticos de las propiedades mecánicas de las probetas de la muestra 2. ...	47
Tabla 14. Datos estadísticos de las propiedades mecánicas de las probetas de la muestra 3. ...	50
Tabla 15. Datos estadísticos de las propiedades mecánicas de las probetas de la muestra 4. ...	51
Tabla 16. Datos estadísticos de las propiedades mecánicas de las probetas de la muestra 5. ...	52
Tabla 17. Datos estadísticos de las propiedades mecánicas de las probetas de la muestra 6. ...	54
Tabla 18. Contenido teórico de PLA (%) y contenido real promedio de PLA (%) de las muestras 1, 3, 4, 5, 7.	55
Tabla 19. Datos estadísticos de las propiedades mecánicas de las probetas de la muestra 7. ...	64
Tabla 20. Contenido teórico de PLA (%) y contenido real promedio de PLA (%) de las muestras 1, 7.	65
Tabla 21. Datos estadísticos de las propiedades mecánicas de las probetas de la muestra 8. ...	67
Tabla 22. Datos estadísticos de las propiedades mecánicas de las probetas de la muestra 9. ...	71
Tabla 23. Datos estadísticos de las propiedades mecánicas de las probetas de la muestra 10. ...	73
Tabla 24. Datos estadísticos de las propiedades mecánicas de las probetas de la muestra 12. ...	80
Tabla 25. Datos estadísticos de las propiedades mecánicas de las probetas de la muestra 13. ...	82
Tabla 26. Datos estadísticos de las propiedades mecánicas de las probetas de la muestra 14. ...	84



Tabla 27. Coste de los materiales utilizados para la fabricación de los compuestos.	88
Tabla 28. Tiempo de uso de las máquinas de ensayos (compresión y ensayos de tracción).	89
Tabla 29. Tiempo total de uso de los equipos.....	89
Tabla 30. Coste total personal.....	89
Tabla 31. Coste total del proyecto de investigación.	89

1. INTRODUCCIÓN

1.1. MOTIVACIÓN

La amenaza que supone para muchos ecosistemas el vertido de residuos sólidos ha llevado a la entrada en vigor de nuevas leyes relativas a la producción de residuos y al cuidado del medio ambiente. La Unión Europea cuenta con algunas de las normas medioambientales más estrictas del mundo [1]. Entre las prioridades del séptimo Programa General de Acción de la Unión en materia del medio ambiente (PMA) destaca la transformación de los residuos en recursos, además de fortalecer ideas como la prevención (en la generación de residuos), reutilización y el abandono de prácticas perjudiciales y antieconómicas como los vertederos [2].

Como respuesta, en las últimas décadas ha tenido un gran auge el desarrollo de materiales renovables. Destaca el esfuerzo realizado para la obtención de productos biodegradables cuyos residuos, no suponen un problema ecológico [3]. Este proyecto forma parte de una investigación cuyo objetivo es optimizar la fabricación de materiales compuestos de fibras vegetales naturales (NFC). Los componentes de los NFC proceden de fuentes renovables, lo que hace que estos productos sean biodegradables. Además de esta característica, los NFC son interesantes debido a su capacidad para ser reciclados, lo que permite optimizar su vida útil [4].

Desde el punto de vista del impacto ambiental generado por el uso de estos materiales, las ventajas son remarcables. También es importante evaluar las propiedades mecánicas de estos compuestos para poder definir aquellos campos en los que su aplicación es posible. Uno de los más interesantes compuestos desde el punto de vista de propiedades mecánicas es el constituido por fibras de lino reforzado con poly-L-lactide (PLLA), este presenta una elevada resistencia específica a tracción y un modulo elástico comparable al de materiales compuestos de fibra de vidrio [4].

Los materiales compuestos de fibra de vidrio tienen una alta aplicación en la actualidad. El hecho de que estos tengan propiedades mecánicas equiparables a las de materiales compuestos de fibras vegetales, ofrece una idea de las posibles aplicaciones que tienen estos últimos. Algunos ejemplos recientes de la aplicación de compuestos de fibras vegetales son: la motocicleta eléctrica 'Be.e' cuya estructura está fabricada con fibras de cáñamo [5]; la raqueta 'Artengo TR89' cuya composición de lino natural contribuye a la absorción de las vibraciones de impacto [6]; el modelo de guitarra 'Blackbird El Capitán'. Blackbird presenta con este modelo el uso de Ekoa, un material compuesto de fibras vegetales, como alternativa a los materiales usados tradicionalmente en la fabricación de guitarras [7].



Figura 1. Motocicleta eléctrica 'Be.e' [5], raqueta 'Artengo TR890' [6] y guitarra 'Blackbird El Capitán' [7].

Existe una alta variedad de fibras naturales cuyas propiedades permitirían su implementación en la fabricación de materiales compuestos biodegradables [8]. A pesar de ello, uno de los mayores problemas en la actualidad es la carencia de métodos de fabricación optimizados para estos compuestos [9]. No todos los métodos de fabricación empleados para la obtención de materiales compuestos tradicionales son aplicables a los compuestos biodegradables. Tanto el tipo de fibra natural escogida, como el proceso de fabricación seleccionado, son parámetros que condicionan las propiedades mecánicas finales del material compuesto.

Se conocen las ventajas relativas al impacto ambiental de los materiales compuestos biodegradables, también se ha expuesto la necesidad de desarrollar y optimizar procesos de fabricación adecuados a éstos. En la Universidad Carlos III de Madrid ya se han desarrollado investigaciones acerca de materiales compuestos biodegradables. Estas investigaciones han permitido generar un proceso de fabricación para compuestos con refuerzo de fibras tejidas, sin embargo no se han llevado a cabo estudios sobre compuestos con laminados unidireccionales ni sobre procesos de fabricación adaptados a este tipo de refuerzo. Entre las características de los compuestos con laminados unidireccionales destaca su capacidad para aportar la resistencia del material en una dirección determinada, hecho que permite eliminar ciertas limitaciones impuestas por el uso de fibras tejidas.

Uno de los objetivos de este trabajo es evaluar la fabricación, mediante un proceso basado en la compresión, de compuestos con distintas fibras vegetales. Esta valoración se hace a través del estudio de dichos compuestos y sus propiedades tras su fabricación y caracterización.

1.2. OBJETIVOS

Este trabajo forma parte de un proyecto de investigación cuyo objetivo es optimizar la fabricación de materiales compuestos 100% biodegradables. Antes del inicio del trabajo, la investigación había logrado desarrollar un proceso de cinco minutos de duración que permite producir compuestos, con refuerzo de tejido de lino, capaces de alcanzar una tensión máxima de 100MPa.

Se parte de los logros alcanzados en esta investigación para definir los objetivos del presente proyecto:

- Fabricar, con los medios disponibles para la investigación, un material compuesto laminar con refuerzo unidireccional de lino con propiedades mecánicas equiparables a las de los compuestos con refuerzo de tejido ya fabricados. El interés por lograr este

objetivo radica en la capacidad de los materiales compuestos con refuerzo unidireccional de aportar su resistencia en una dirección determinada.

- Si se logra el primer objetivo, comparar el proceso escogido para la fabricación de compuestos con refuerzo unidireccional con el proceso desarrollado en proyectos previos de la investigación. Dada la complejidad de los parámetros que intervienen en los procesos basados en compresión con placas calefactoras, esta comparación podría contribuir a la optimización de dichos procesos.
- Valorar la capacidad de fibras vegetales alternativas al lino para conformar el refuerzo de compuestos fabricados mediante compresión con placas calefactoras.

1.3. RESUMEN

En este capítulo se describe cada uno de los apartados que conforman el trabajo.

En el apartado de antecedentes se exponen las diferencias más significativas entre los materiales compuestos tradicionales y los materiales compuestos biodegradables. Asimismo se describen los procesos de fabricación desarrollados para los compuestos biodegradables y se introduce el estado actual de investigaciones relevantes para la ejecución de este trabajo.

En el apartado de proceso de fabricación y ensayos, se detalla el proceso de fabricación efectuado para la obtención de los materiales compuestos que han sido analizados en el trabajo. Además, en este apartado se describen los ensayos de tracción que han permitido caracterizar dichos materiales.

En el apartado de resultados se procesan los datos extraídos de los ensayos para obtener información relativa a las propiedades mecánicas de los compuestos. Además, en este apartado se analiza dicha información junto con otras características de los compuestos producidos.

En el apartado de presupuesto se evalúan los costes relativos a la fabricación y ensayo de los compuestos estudiados.

En el siguiente apartado se extraen una serie de conclusiones en base a los resultados obtenidos.

Por último, en el apartado de trabajos futuros se plantean una serie de estudios que pueden resultar de utilidad para optimizar la fabricación de materiales compuestos biodegradables mediante procesos de compresión con placas calefactoras.

2. ANTECEDENTES

En este capítulo se exponen las características más destacadas de los materiales compuestos con mayor uso en la industria. Asimismo se narra el origen de los materiales compuestos biodegradables y se detallan las diferencias más significativas entre los compuestos tradicionales y los compuestos biodegradables. Por último se exponen los métodos de fabricación relativos a los compuestos biodegradables y se introduce el estado actual de investigaciones relevantes para este trabajo.

2.1. MATERIALES COMPUESTOS

Los materiales compuestos resultan de la combinación de dos o más componentes. El material compuesto que se obtiene de esta combinación posee propiedades superiores a las de los componentes por separado. Existen materiales naturales que cumplen con esta descripción, tales como los que constituyen nuestros huesos etc. Estos, junto con los materiales cerámicos o el hormigón armado, quedan fuera la definición de material compuesto que atañe a este proyecto. Un material compuesto presenta dos elementos principales: agente de refuerzo y matriz. Además de estos, existen otros tipos de componentes como cargas y aditivos que dotan a los materiales compuestos de características peculiares [10]. Dado que en este trabajo se fabrican y estudian materiales compuestos de fibras vegetales, es importante evaluar los componentes de los materiales compuestos con refuerzo de fibras que han sido utilizados tradicionalmente en la industria.

2.1.1. FIBRAS TRADICIONALES

En relación a las fibras, estas constituyen el componente de refuerzo del material compuesto. Sus principales características son su resistencia a la tracción específica y su elevado módulo elástico específico. Las fibras destacan por aportar resistencia mecánica, rigidez y dureza al material compuesto. Son determinantes para obtener buenas propiedades mecánicas. Las fibras usadas tradicionalmente en la industria de los materiales compuestos se pueden clasificar según su origen.

Tabla 1. Clasificación de las fibras tradicionales según su origen [11].

FIBRAS DE ORIGEN MINERAL	Fibras Cerámicas (Carburo de Silicio, Aramida) Fibras Metálicas Fibras de origen inorgánico(Carbono, Vidrio, Boro)
FIBRAS DE ORIGEN ORGÁNICO	Aramida, Polietileno

A continuación se detallan algunas de las características de las fibras comúnmente utilizadas en la fabricación de los materiales compuestos. Analizar estos puntos permite comprender las diferencias entre estas fibras y las de origen vegetal, así como las competencias que cubren

hoy en día los materiales compuestos tradicionales y por tanto los usos para los que deben ser concebidos los compuestos biodegradables.

1. Fibras de Carbono. La fibra de Carbono se fabrica a partir de ciertos precursores de fibra orgánica, siendo el más común el denominado PAN (precursor poliacrilonitrilo). Las fases para su obtención constarían de un proceso de estabilización dimensional a partir de filamentos de PAN estirados; Un proceso de carbonización a altas temperaturas durante el cual muchos elementos diferentes al carbono desaparecen; Un proceso de grafitización que tiene lugar a muy altas temperaturas (2000°C) y por último tratamientos superficiales [11].

Según las temperaturas del tratamiento de calentamiento se identifican tres tipos diferentes de fibras de Carbono [11].

-Fibras de Carbono de alto módulo (HM). Son las más rígidas y requieren la mayor temperatura en el tratamiento.

-Fibras de Carbono de alta resistencia (HR). Es la más fuerte.

-Fibras de Carbono a baja temperatura de tratamiento. La rigidez es menor que en las anteriores, su obtención es la más económica.

A continuación se detallan las propiedades de estas fibras de carbono.

Tabla 2. Propiedades de distintos tipos de fibra de carbono [11].

Tipo de fibra	Alta Resistencia(HR)	Alto Módulo(HM)	Tratamiento baja T ^a
Diámetro de hilo (μm)	8	7	7-8
Densidad (Kg/m ³)	1740-1760	1810-1870	1820
Módulo de elasticidad (GPa)	230	390	290
Resistencia a tracción (GPa)	2.6-5	2.1-2.7	3.1
Elongación a la rotura (%)	2	0.7	1.1
Modulo específico	130	210	160
Coefficiente de expansión térmica (10 ⁻⁶ /°C)	2.56	2.56	2.56

La fibra de Carbono es un material idóneo para aplicaciones en estructuras sometidas a fatiga, ya que sus propiedades mecánicas apenas son sensibles a la aplicación de cargas cíclicas. También presenta propiedades muy elevadas ante condiciones estáticas. Además su baja densidad hace que sus propiedades mecánicas por unidad de peso sean excepcionales. Es aplicada en numerosos sectores, destacando el aeroespacial, también presenta un uso recurrente en deportes, transporte terrestre etc. Uno de los inconvenientes que presenta la fibra de Carbono es su baja resistencia a los impactos de baja energía además de su elevado coste respecto a otras fibras.

2. Fibras Orgánicas. Destacan las denominadas aramidas. La fibra de aramida es relativamente nueva, y se caracteriza por su resistencia y rigidez, su fabricación se lleva a cabo por procesos de extrusión e hilado y su módulo (E) alcanza un valor 70-130GPa [11]. Los materiales

compuestos de fibra de aramida son considerados de altas prestaciones dadas las altas características mecánicas que presentan. En el mercado se puede encontrar la fibra de aramida bajo el nombre de Kevlar y entre sus usos destaca el refuerzo de neumáticos, uso para la fabricación de paracaídas, sistemas balísticos y de armamento etc.

3. Fibra de vidrio. Los primeros estudios ingenieriles sobre materiales compuestos se realizaron sobre compuestos de fibra de vidrio. Es el refuerzo más utilizado en la fabricación de materiales compuestos, sobre todo en aplicaciones industriales, lo que se debe a su gran disponibilidad, sus buenas características mecánicas y su bajo coste [11].

La fabricación de la fibra de vidrio se basa en el estiramiento a muy alta temperatura de una veta de vidrio fundido y su inmediata solidificación, entre las fases de su fabricación destacan: Composición-Fusión, en la que las materias primas se mezclan de forma homogénea y se introducen en un horno donde la temperatura del tratamiento depende del tipo de vidrio con el que se trabaje. Una segunda fase de fibrado y bobinado, proceso que se lleva a cabo por colado por gravedad. Un proceso de estiramiento rápido y enfriado por radiación y pulverización de agua. Con este proceso se obtienen filamentos con diámetros del orden de unidades de μm . Una fase final de revestimiento, pues el material al llegar a este punto presenta una baja resistencia a la abrasión (tanto con otras superficies como consigo mismo), no presenta además cohesión entre sus filamentos, es muy sensible al ataque de agua y presentaría fallos de unión química con la matriz no pudiendo adaptarse a los procesos de transformación. Este revestimiento se produce cuando el material mantiene una temperatura entre 80 y 120 °C.

Existe una alta variedad de fibras de vidrio, con diferentes aplicaciones, atendiendo a sus propiedades, los tipos más destacados son los siguientes [11].

-Vidrio E: Constituye casi la totalidad de la fibra de vidrio con presentación industrial textil, es de uso general, tiene buenas propiedades eléctricas y es el más extendido.

-Vidrio A: Es menos resistente y presenta un menor módulo que el vidrio E. Tiene una gran resistencia química.

-Vidrio AR: Puede ser combinado con hormigón o cemento.

-Vidrio C: Destaca por su resistencia química, se usa en las capas superficiales de las estructuras anticorrosión.

-Vidrio R o S: Se emplea en estructuras que requieren altas características mecánicas, con una resistencia a la tracción y un módulo de elasticidad muy superiores a los otros tipos de vidrio. Nació por la demanda de sectores como la aviación, espacial o armamentístico y cumple con elevadas exigencias de resistencia a fatiga, temperatura y humedad.

-Vidrio D: Usado para la fabricación de materiales electrónicos de telecomunicaciones, fabricación de radares etc.

Entre las características generales de la fibra de vidrio destacan: La buena adherencia fibra-matriz; La resistencia mecánica; Baja conductividad eléctrica; Incombustibilidad; Estabilidad

dimensional; Débil conductividad térmica (lo que permite su uso en la construcción suprimiendo puentes térmicos); Flexibilidad.

A continuación se detallan las propiedades de varios tipos de fibra de vidrio.

Tabla 3. Propiedades de distintos tipos de fibra de vidrio [11].

Tipo de fibra	Vidrio A	Vidrio E	Vidrio S	Vidrio R
Diámetro de hilo (μm)	5-13	10-20	10	10
Densidad (Kg/m^3)	2500	2580	2480	2590
Módulo de elasticidad (GPa)	69	72.5	86	85
Resistencia a tracción (GPa)	3.1	3.4	4.59	3.4-4.4
Modulo específico	28	28	34	33
Coefficiente de expansión térmica ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	8.6	5	5.1	5

Los principales modos de presentación industrial de la fibra de vidrio son:

Mat: Los hilos son aglomerados entre sí mediante un ligante, dando lugar a láminas cuyo principal uso se da en la fabricación por moldeo.

“Roving” (Bonina de hilo): Existe una alta variedad de tipos de “roving” que se adaptan a los métodos de transformación.

Tejido: Presenta una gran facilidad de manipulación, con un peso por unidad de superficie uniforme y con alta capacidad de impregnación, lo que determinará los procesos de fabricación para este tipo de presentación.

De esta forma quedan expuestos los principales tipos de fibra utilizados tradicionalmente en la fabricación de materiales compuestos. Además queda reflejada su gran implantación en la industria.

2.1.2. MATRICES TRADICIONALES

En cuanto a las matrices, las más utilizadas en materiales compuestos son las orgánicas termoplásticas, que pueden ser tratadas térmicamente y las orgánicas termoestables que no presentan cambio de estado (sólido-líquido) al aumentar la temperatura. Las matrices de uso más extendido son las compuestas de polietileno(PE), polipropileno(PP) y las resinas epoxi. En los siguientes apartados se amplía la información relativa a estas matrices.

2.2. MATERIALES COMPUESTOS BIODEGRADABLES

Los materiales compuestos biodegradables destacan frente a los tradicionales por el bajo impacto ambiental que supone su producción, por las ventajas asociadas a la gestión de sus residuos y por su mayor capacidad para descomponerse en compuestos más sencillos bajo la acción ambiental. Características que han de ser comunes tanto a la matriz como al refuerzo que componen el material.

El origen de los materiales compuestos biodegradables está relacionado con los estudios e investigaciones que comenzaron a valorar el uso de fibras vegetales como refuerzo de materiales compuestos. En la década de los noventa comienzan a aparecer estudios que

resaltan las ventajas que supone el uso de las fibras vegetales en la fabricación de los materiales compuestos [12]. En un primer momento la implantación de estas fibras no es destacada por su fuerza y rigidez frente a las fibras tradicionales (carbón, aramida, vidrio) sino por los reducidos costes que conlleva su producción (dados los escasos requerimientos tecnológicos), el bajo impacto ambiental de sus procesos de producción, su baja densidad (lo que permite reducir considerablemente la masa del compuesto) y las ventajas asociadas a la gestión de residuos derivados de este tipo de fibras [12]. En los siguientes apartados se comparan las matrices y fibras tradicionales frente a los componentes considerados biodegradables por sus características. La información contenida en estos apartados procede de investigaciones y proyectos acerca de materiales compuestos, fibras y matrices. Esta información recoge puntos que han servido de motivación para investigaciones y proyectos actuales (incluido el presente trabajo) relacionados con el estudio de los materiales compuestos biodegradables.

2.2.1. FIBRAS VEGETALES VS FIBRAS TRADICIONALES

En este apartado se valoran el coste, impacto ambiental y propiedades mecánicas de las fibras tradicionales y de las fibras vegetales más estudiadas.

2.2.1.1. COSTES

En relación a los costes, entre las fibras tradicionales cabe destacar el bajo precio de la fibra de vidrio frente a la fibra de Carbono y el Kevlar. Sin embargo la producción de fibras naturales supone una reducción adicional de coste frente a la fibra de vidrio, de hecho su producción es relevante en muchos sectores, como muestra de ello destacan:

- El uso de algodón en el ámbito textil [13].
- El uso del fique para la producción de telas en la industria del calzado y de los geotextiles [13].
- El Kenaf, cuya fibra es usada para la producción de tela para ropa, calzado, velas y que destaca por el tamaño de los cultivos y su duración de tres meses, factores que entre otros minimizan su coste [13].
- El yute, una de las fibras naturales más comunes en países como India, China, Bangladesh etc. Su comercialización tiene una especial importancia en la economía de la India, teniendo diversas aplicaciones en materiales de mobiliario y en la industria textil y encontrándose entre las fibras menos costosas del mercado [13].

Esto demuestra que a pesar de que el uso de fibras vegetales no está extendido entre los sectores ingenieriles, son materiales que presentan una gran accesibilidad. En base a lo anterior los datos de volumen de producción anual revelan los avances y la experiencia que existe en la producción de este tipo de fibras. Esto implicaría una gran reducción de costes de procesado si el uso de estas fibras se implementase en la industria de los materiales compuestos. Un ejemplo se da en la energía requerida para la producción de 1 kg de fibra de vidrio. Este proceso requiere un consumo de 54 MJ, valor que destaca frente a los 15 MJ requeridos para la obtención de 1 kg de fibra de kenaf [14].

Tabla 4. Coste y producción de distintas fibras vegetales y sintéticas incluidos datos del acero [9].

Fibra	Precio(US\$/Kg)	Producción(Tn)
Lino	0.4-3.5	1,602,047
Cáñamo	1.55	30,000
Yute	0.925	3,583,235
Caña de azúcar	0.48	1,832,541,194
Algodón	1.9	25,000,000
Vidrio	2	-
Carbono	300	-
Kevlar	150	-
Acero	0.38	1,509,800,000

2.2.1.2. IMPACTO AMBIENTAL

Existen además estudios que cuantifican el impacto ambiental que supone la producción de fibras vegetales. Los datos revelados por estos informes muestran las ventajas ecológicas de la producción de fibras vegetales como el lino frente a la producción de fibra de vidrio. Destacan que la mayor parte de indicadores ambientales como son el cambio climático, la acidificación, el consumo de energía de los procesos... son favorables a la producción de fibras de lino. Además presentan claves para la optimización de los procesos de producción de fibras vegetales con el objetivo de reducir los métodos de extracción mecanizados (que suponen altos costes energéticos) y el uso de productos químicos como fertilizantes en los cultivos que incrementa problemas como la eutrofización (problema que afecta a los ecosistemas acuáticos). En conclusión, estos trabajos demuestran que la producción de fibras vegetales se presenta como una alternativa atractiva desde el punto de vista medioambiental a la producción de fibras tradicionales como la fibra de vidrio [15].

También es importante destacar las ventajas que conlleva desde el punto de vista de la gestión de residuos el uso de materiales de origen natural, lo que está relacionado con la biodegradabilidad de los materiales naturales frente al tiempo de descomposición de los materiales sintéticos o minerales. A continuación se refleja en una tabla los valores medios del tiempo de descomposición de distintos materiales. De esta forma queda patente la diferencia, relativa al impacto ambiental, que supone el desecho de materiales naturales frente a otros.

Tabla 5. Tiempo de descomposición de distintos materiales [16].

Material	Tiempo de descomposición
Papel Convencional	1 mes
PHB	1 mes
Algodón	1-5 meses
Almidón	2 meses
Lana	1 año
Bamboo	1-3 años
Chicle de mascar	5 años
Plástico	450 años
Vidrio y Neumaticos	Tiempo indeterminado

2.2.1.3. PROPIEDADES MECANICAS

En relación a sus propiedades, a diferencia de las fibras tradicionales, que pueden producirse con un rango definido de las mismas, las características de las fibras vegetales varían considerablemente dependiendo de múltiples factores como el origen de la fibra (si procede de tallo o de hoja), la calidad de la localización de la planta y los tratamientos aplicados sobre la fibra [12].

Dependiendo de su origen las fibras vegetales se pueden clasificar en semilla, líber (tejido vegetal constituido por los vasos o conductos que transportan la savia elaborada), hoja o fruto. Las cualidades de la fibra dependen de esta clasificación. Las propiedades más interesantes pertenecen al grupo de las denominadas fibras-duras, a este grupo corresponden las fibras provenientes de líber y hoja (las fibras extraídas tradicionalmente del lino, yuteo ramio pertenecen a este grupo) [12]. Otro de los factores condicionantes de las propiedades de las fibras vegetales es su composición. Prácticamente en todos los casos la celulosa es el componente principal de las fibras vegetales lo que explica su naturaleza hidrófila y el contenido de humedad que presentan 8-12.6 % [12]. Es importante destacar que la fuerza y resistencia de las fibras está relacionada con su alto contenido en celulosa, en concreto en relación con las fibrillas de las macromoléculas de celulosa, estas forman espirales a lo largo del eje de la fibra, cuanto menor sea el ángulo entre el eje y las fibrillas de la fibra, mayor son las propiedades mecánicas de la fibra, a parte del contenido en celulosa también influyen las dimensiones celulares [12].

Tabla 6. Propiedades de distintas fibras vegetales [12,17].

Fibra	Celulosa (%)	Tamaño de celda (mm)	Angulo de la espiral (°)	Resistencia a tracción (MPa)	Modulo de Young (GPa)
Yute	61.0	2.3	8.0	393-800	13-26.5
Lino	71.0	20.0	10.0	345-1830	27-65
Cáñamo	74.4	23.0	6.2	550-1100	38-70
Ramio	68.6	154.0	7.5	400-938	61.4-128
Sisal	78.0	2.2	20.0	468-700	9.4-22
Coco	43.0	0.8	45.0	131-220	4-6

En anteriores apartados se mencionan los altos costes asociados a la producción de fibras de carbono y kevlar, sin embargo también se han expuesto sus propiedades dejando patente que se trata de fibras de altas prestaciones con aplicaciones muy específicas (industria aeroespacial, deportes de competición...). Al ser la fibra de vidrio la más apropiada para aplicaciones de bajo coste, es la fibra de uso más extendido y aquella para la que las fibras vegetales pueden suponer una alternativa en la fabricación de materiales compuestos. Las buenas propiedades mecánicas, junto con los bajos valores de densidad (características reflejadas en tablas previas) hacen que ciertas fibras vegetales sean muy atractivas en este aspecto, ya que sus propiedades mecánicas específicas son comparables a las de ciertos tipos de fibra de vidrio. La siguiente tabla permite comparar las propiedades mecánicas y la densidad de diferentes tipos de fibras y el acero.

Tabla 7. Propiedades de distintas fibras vegetales y sintéticas incluidos datos del acero [9, 18].

Fibra	Densidad(g/cm ³)	Deformación de Rotura (%)	Resistencia Tracción(MPa)	Módulo Young(GPa)
Algodón	1.5	7-8	287-597	5.5-12.6
Yute	1.3	1.5-1.8	393-773	26.5
Lino	1.5	2.7-3.2	345-1025	27.5
Bambú	0.8	-	391-1000	48-89
Piña	-	1.6	413-1627	34.5-82.5
Madera Blanda	1.5	-	1000	40
Vidrio	2.55	2.5-3.7	2000-3500	70-73
Carbono	1.78	1.4-1.8	3400-4800	240-425
Kevlar	1.44	2.5-3.7	3000	60
Acero	7.85	10-30	215-830	210

Destaca principalmente por sus propiedades mecánicas específicas la fibra de lino. Esto ha conducido a que muchas investigaciones sobre materiales compuestos biodegradables se centren en el uso de este material como refuerzo. Las fibras en sí presentan unas elevadas propiedades mecánicas, pero su aplicación requiere que sean tratadas en procesos de hilado, o precisa su unión por medio de matrices, esto reduce mucho sus propiedades. A pesar de ello los materiales compuestos derivados de estas fibras combinan valores de masa reducidos y elevadas características de rigidez y fuerza. Muestra de ello son los materiales compuestos con refuerzo de lino fabricados en investigaciones previas a este trabajo. Estas han permitido la obtención de un material capaz de alcanzar una tensión máxima de 100MPa [18, 19].

2.2.2. MATRICES BIODEGRADABLES VS MATRICES SINTÉTICAS TRADICIONALES

Para conformar materiales compuestos biodegradables, la matriz que constituye estos materiales debe presentar unas características específicas en cuanto a su capacidad de reciclaje, coste y origen.

El desarrollo de nuevas matrices es uno de los campos en los que más se está centrando la investigación en materiales compuestos. En general, la matriz debe presentar, una buena cohesión con las fibras del compuesto; resistencia a las agresiones ambientales; buena resistencia a la cortadura y tenacidad. A continuación se evalúan estas propiedades en matrices tradicionales y en las denominadas matrices biodegradables.

Estudios actuales resaltan la posibilidad de combinar matrices sintéticas tradicionales (poliméricas) con fibras naturales, dadas las ventajas relativas al coste y la baja densidad de este tipo de fibras. Uno de los inconvenientes en el desarrollo de estos materiales es la incompatibilidad entre las fibras naturales en su modo de presentación y la matriz polimérica [12]. Las causas de esta radican en la naturaleza hidrofílica de las fibras naturales, dado su alto contenido en celulosa, en contraste con la naturaleza hidrofóbica de las matrices poliméricas, lo que conduce a problemas de cohesión entre la fibra natural y la matriz [20]. Otra desventaja es la baja temperatura de degradación de las fibras naturales frente a la temperatura de procesamiento de los termoplásticos (superior a 200°C) [21]. Estas incompatibilidades se reflejan en la formación de agregados durante la fabricación del material compuesto. Como consecuencia se ven mermadas su durabilidad, la resistencia al fuego y la humedad además de

producir una alta variabilidad de las propiedades del producto final [20]. Con el fin de mejorar la cohesión entre las fibras naturales y las matrices poliméricas tradicionales se han desarrollado tratamientos físicos y químicos que aplicados a las fibras buscan mejorar el anclaje mecánico con la matriz o reducir su naturaleza hidrofílica [20]. A pesar de estas dificultades, el uso de matrices poliméricas tradicionales conlleva una gran resistencia frente a las acciones ambientales, lo que aporta una alta resistencia a corrosión al conjunto del material compuesto [13].

Con el fin de obtener un producto totalmente biodegradable los bioplásticos presentan una alternativa a estas matrices tradicionales [19]. Las más empleadas son el ácido poliláctico (PLA) de uso extendido en la impresión 3D, el ácido poli-L-láctico (PLLA) obtenido de almidón de maíz y ciertas raíces, el PHB producido por microorganismos o el quitosán, obtenido del exoesqueleto de algunos crustáceos [19]. Uno de los inconvenientes que presentan estos tipos de matriz es la baja resistencia a la acción ambiental en comparación con las matrices tradicionales, teniendo en cuenta que la resistencia a la corrosión es un factor fundamental se han desarrollado una serie de tratamientos físicos y químicos con el fin de mejorar en este sentido el material compuesto, estos tratamientos en algunos casos también alteran las fibras del compuesto llegando incluso a mejorar sus propiedades mecánicas. Algunos de estos tratamientos son la acetilación, la alcalinización y tratamientos de ondas [19, 3].

Otra característica de estas matrices biodegradables es que son termoplásticas, lo que permite su procesamiento mediante métodos térmicos. En la tabla 8 se muestra una comparativa de las temperaturas de fusión de distintos polímeros usados como matrices.

Esto es relevante en varios sentidos. Por un lado la fibra vegetal presenta un comportamiento sensible a las altas temperaturas, luego la temperatura es un parámetro relevante en el procesamiento del material compuesto [9]. Por otro lado, el hecho de que la matriz comience a fundirse a partir de una determinada temperatura condiciona las aplicaciones del material compuesto en función de la temperatura máxima de servicio, esto es significativo de cara a la pérdida de propiedades del compuesto. Además, el hecho de que la matriz se pueda licuar tantas veces como sea necesario mediante calentamientos muestra las ventajas que supone su uso desde el punto de vista de su reciclaje [9]. Teniendo en cuenta lo anteriormente mencionado en relación a los límites de temperatura en el procesamiento de las fibras vegetales, se deben escoger matrices que no requieran altas temperaturas para su procesamiento. El PLA presenta una temperatura de transición vítrea de entorno a 60°C y una temperatura de fusión de entorno a 130-230°C [22], esto lo hace compatible con la mayor parte de las fibras naturales.

En lo relativo a las propiedades mecánicas de las matrices biodegradables, en las siguientes tablas se muestra una comparativa entre distintos tipos de polímeros usados en matrices.

Tabla 8. Propiedades de distintos polímeros biodegradables [17].

Polímeros Biodegradables	Densidad (g/cm ³)	Temperatura de fusión(°C)	Resistencia a tracción(MPa)	Módulo de Young(GPa)	Deformación Máxima(%)
Almidón	1-1.39	110-115	5-6	0.125-0.85	31-44
PLA	1.21-1.25	150-162	21-60	0.35-3.5	2.5-6
PLLA	1.25-1.29	170-190	15.5-65.5	0.83-2.7	3-4
PHB	1.18-1.26	168-182	24-40	3.5-4	5-8
PHBV	1.23-1.35	144-172	20-25	0.5-1.5	17.5-25

Tabla 9. Propiedades de distintos polímeros tradicionales [17, 23, 24, 25].

Polímeros tradicionales	Densidad (g/cm ³)	Temperatura de fusión(°C)	Resistencia a tracción(MPa)	Módulo de Young(GPa)	Deformación Máxima(%)
PP	0.9-1.16	161-170	30-40	1.1-1.6	20-400
PE	0.93	120-180	23	0.14-0.9	200-600
Polyester	1.19	220-267	57-60	1.93-3	-
Epoxy	1-1.81	120-130	45-83	10.5	0.8

Una de las ventajas que supone el uso de fibras vegetales es su bajo coste respecto a las fibras tradicionales dado su extendido uso en múltiples sectores. Sin embargo el uso de polímeros biodegradables no es tan amplio como el de los polímeros derivados del petróleo, esto se traduce en una diferencia de precios relevante. En la siguiente tabla se muestra el coste de distintos polímeros.

Tabla 10. Coste de distintos polímeros [17, 26, 27].

Polímero	Precio(US\$/Kg)
Almidón	5.5
PLA	2.42
PLLA	4.5
PHB	4
PHBV	3.5
Chitosan	15
PP	1.65
PE	3
PVC	1
Epoxi	2.5

La tabla muestra que el coste del PLA es cercano al de algunos polímeros de uso tradicional en la fabricación de matrices, sin embargo se espera que de este material se produzca en los próximos años un incremento de producción, lo que conllevaría una reducción de su coste [16]. Este hecho, junto con sus elevadas propiedades mecánicas en comparación con otros polímeros derivados del petróleo y el rango de temperaturas asociado a su procesamiento, hacen del PLA un material interesante en lo referente a la producción de materiales compuestos completamente biodegradables.

2.3. PROCESOS DE FABRICACIÓN

En este apartado se describen los procesos de fabricación aplicables a materiales compuestos biodegradables.

La aplicación de los métodos de fabricación de materiales compuestos tradicionales en la producción de compuestos biodegradables presenta restricciones. Las limitaciones parten de la naturaleza de las matrices que pueden ser utilizadas en compuestos biodegradables. Estas matrices, al ser termoplásticas, limitan dichos procesos. Por ejemplo no son aplicables entre otros, los procesos de moldeo por inyección de termoestables [19]. La fabricación de materiales compuestos biodegradables presenta además una serie de ventajas respecto a los procesos propios de los compuestos tradicionales. Destacan el bajo consumo energético y unas condiciones de trabajo más saludables para los trabajadores [19]. Entre las técnicas aplicables a materiales compuestos de fibras vegetales y matrices termoplásticas destacan el moldeo por inyección de termoplásticos reforzados, el moldeo por compresión y los procesos de extrusión [19].

Antes de detallar estos procesos se deben comentar ciertos factores que condicionan la fabricación de los compuestos biodegradables.

El contenido de humedad puede ser un factor determinante del comportamiento biológico del material compuesto por fibras vegetales, el proceso de secado durante el procesamiento es por tanto un paso fundamental previo al procesado. La presencia de humedad provoca, generalmente durante el procesado, la formación de vapor de agua. Esto puede generar múltiples problemas, especialmente en procesos de moldeo posteriores, pues estos gases incrementan la porosidad del producto final lo que afecta a las propiedades mecánicas del compuesto [28]. Además, cuanto mayor es el contenido de humedad de la fibra, más propensa es esta a la descomposición. Tanto el tipo de fibra vegetal como el ambiente en el que esta se encuentra (humedad relativa, temperatura) son factores determinantes del contenido de humedad de estas fibras. Sin embargo también es necesario añadir que un pequeño contenido de humedad no es perjudicial, todo lo contrario, permite ablandar la celulosa contenida por las fibras, y cumplir funciones de lubricación [28]. En cualquier caso es necesario llevar a cabo procesos de secado de los productos vegetales, existen también tratamientos que permiten reducir tanto los niveles de humedad propios de la fibra vegetal, como su capacidad de absorción de agua. Además, el hecho de mantener los materiales vegetales en ambientes favorables en cuanto a humedad relativa y temperatura condiciona las propiedades del compuesto obtenido a partir de estos productos vegetales [3]. Otro factor determinante del proceso de fabricación es el tipo de fibra y su composición, tanto el tipo de fibra (corta o larga), como el diámetro de la misma y su composición química tienen una gran influencia y determinan entre otras cosas los parámetros del procesamiento (presión, temperatura...) y la maquinaria necesaria para el mismo [3]. En adelante se detallan los procesos aplicados a compuestos biodegradables de matriz polimérica que optimizan las propiedades del producto final.

- **Extrusión [3].**

Los métodos de extrusión son muy utilizados por la industria del plástico para la obtención de productos granulares o para producir de forma continua productos semiacabados o componentes. Para el proceso de extrusión puede utilizarse un sistema de tornillo simple o de doble tornillo. El sistema de tornillo simple se utiliza cuando el mezclado de materiales no debe ser completo. Dados los elevados resultados de mezcla en el sistema de doble tornillo la fibra de refuerzo puede ser homogéneamente distribuida e impregnada en el termoplástico fundido. La obtención de productos no acabados es una fase importante en el procesado de materiales compuestos, pues procesos como el moldeo por compresión o el moldeo por inyección pueden requerir el material en distintos estados, uno de los más comunes es el granular que puede obtenerse tal y como se ha descrito por extrusión.

- **Moldeo por inyección de termoplásticos reforzados [29].**

Este proceso permite la realización en discontinuo de piezas muy diversas, desde piezas muy pequeñas (gramos), hasta piezas de varios kilogramos. El proceso de inyección requiere productos granulados que incorporan tanto la resina termoplástica como la fibra. Dependiendo del modo de incorporación de la fibra en la extrusora de tornillo varía el tipo de maquinaria. Se puede introducir la fibra presentada como “roving” a través de un orificio de la extrusora, o bien homogenizar los gránulos de polímero y la fibra para ser ambos introducidos a través de la misma boca de alimentación. Es habitual que los orificios de alimentación de la extrusora estén equipados con sistemas de secado que permitan eliminar la humedad de los materiales. Una vez los componentes son introducidos en la máquina, son calentados (acción combinada de fuerzas de cizallamiento y forros calefactores) y mezclados por medio de un tornillo. Cuando el material alcanza el final de la máquina es inyectado a alta presión, por el avance del tornillo, a través de una pequeña apertura en un molde metálico cerrado, este permanece a una temperatura por debajo del punto de solidificación de la resina. Durante el periodo de enfriamiento y solidificación el tornillo comienza a girar y fundir material de nuevo. Tras la solidificación de la pieza, se expulsa la pieza tras abrir el molde, quedando esté listo para un nuevo ciclo. Este proceso limita el tamaño de la fibra del producto final, pues tanto el giro del tornillo, como las pequeñas aperturas por las que debe fluir el material, provocan cortes y roturas significativas en la fibra. Los parámetros a tener en cuenta en la inyección del material son la temperatura de fusión. Que se trata de la temperatura a la que penetra en el molde el material, y la velocidad de inyección. Velocidad a la que se desplaza el tornillo en el proceso de inyección.

- **Moldeo por compresión [29, 3].**

Los métodos de compresión son muy utilizados debido a la alta reproducibilidad y los bajos tiempos de ciclo. El proceso se lleva a cabo a partir de láminas. El material polimérico y la fibra pueden ser incorporados como componentes independientes, o como un producto constituido por la matriz polimérica ya reforzada. El principio del moldeo por compresión consiste en estampar en un molde los componentes en forma de placas previamente calentadas a una temperatura cercana a la del punto de fusión de la matriz. La presión de moldeo depende del molde, del tamaño de la pieza y de la velocidad de aplicación de la presión. Este método destaca frente al método de moldeo por inyección porque permite obtener piezas mayores y con mejores propiedades mecánicas gracias a distintos factores. Uno de estos factores es la posibilidad de dar un mayor volumen de fibras al producto final al poder trabajar con las fibras de refuerzo en modo de “mat” o en formato tejido.

Por sus características, los métodos de fabricación descritos son los más aplicados en la fabricación de materiales compuestos biodegradables. Existen estudios que destacan las ventajas que presentan los métodos de moldeo por compresión frente al resto de procesos [16]. La siguiente tabla muestra una relación de propiedades mecánicas de distintos materiales compuestos obtenidos a partir de diferentes procesos.

Tabla 11. Propiedades mecánicas de distintos materiales compuestos de fibras naturales [17, 30, 31].

Material Compuesto	Deformación (%)	Resistencia a tracción (MPa)	Módulo de Young (GPa)	Proceso de fabricación
Matriz de almidón + 30% Yute	2 ± 0.2	26.3 ± 0.55	2.5 ± 0.23	Moldeo por Inyección [17]
PP + 30% Yute	1.4 ± 0.1	47.9 ± 2.7	5.8 ± 0.47	Moldeo por Inyección [17]
PLA + 30% Yute	1.8 ± 0	81.9 ± 2.9	9.6 ± 0.36	Moldeo por Inyección [17]
PHBV + 30 % Yute	0.8 ± 0	35.2 ± 1.3	7 ± 0.26	Moldeo por Inyección [17]
PLLA + 30% Lino	2.3 ± 0.2	98 ± 12	9.5 ± 0.5	Moldeo por Compresión [17]
PLA + 30% Lino	-	54.15 ± 4.57	6.13 ± 0.12	Moldeo por Compresión [30]
PLA + 40% Yute	1.6 ± 0.1	100.5 ± 0.4	9.4 ± 0.2	Moldeo por Compresión [31]
PLA + 30% Ramio	4.8 ± 0.2	66.8 ± 1.7	-	Moldeo por Compresión [17]
PP + 30% Lino	2.7 ± 1.5	29.1 ± 4.2	5 ± 0.4	Extrusión + Moldeo por Compresión [17]

En la actualidad, uno de los objetivos de las investigaciones relativas a los compuestos biodegradables es la optimización de estos métodos de fabricación. El desarrollo de procesos de fabricación óptimos constituye un paso importante en la producción de materiales compuestos biodegradables que puedan competir con los compuestos tradicionales. Proyectos previos a este trabajo han permitido desarrollar un proceso basado en la compresión con placas calefactoras capaz de producir compuestos con una resistencia a tracción de 100MPa en un tiempo de cinco minutos [18, 19]. En base a estos proyectos y al método de fabricación descrito en ellos se han fabricado los materiales compuestos estudiados en este trabajo.

3. PROCESO DE FABRICACIÓN Y ENSAYOS

En este apartado se detalla el proceso de fabricación efectuado en el laboratorio para la obtención de los materiales compuestos que han sido analizados en el proyecto. También se describen los ensayos de tracción que han permitido caracterizar dichos materiales.

Tal y como se ha descrito en anteriores apartados algunos de los métodos convencionales de producción de materiales compuestos son aplicables a la producción de compuestos biodegradables. Sin embargo, estos métodos no están específicamente diseñados para producir compuestos biodegradables. Existe por tanto la necesidad de desarrollar procesos optimizados para la fabricación de estos materiales. A falta de un proceso optimizado, en el presente trabajo se han fabricado los materiales en base al proceso de moldeo por compresión aplicado en anteriores proyectos [18, 19], pero adaptándolo al tipo de compuesto que previamente se había planteado caracterizar y estudiar.

El proceso consiste principalmente en el apilamiento de láminas (tanto la matriz polimérica como el refuerzo de fibras vegetales deben presentar este estado) y en la obtención del compuesto final mediante moldeo por compresión con placas calefactoras.

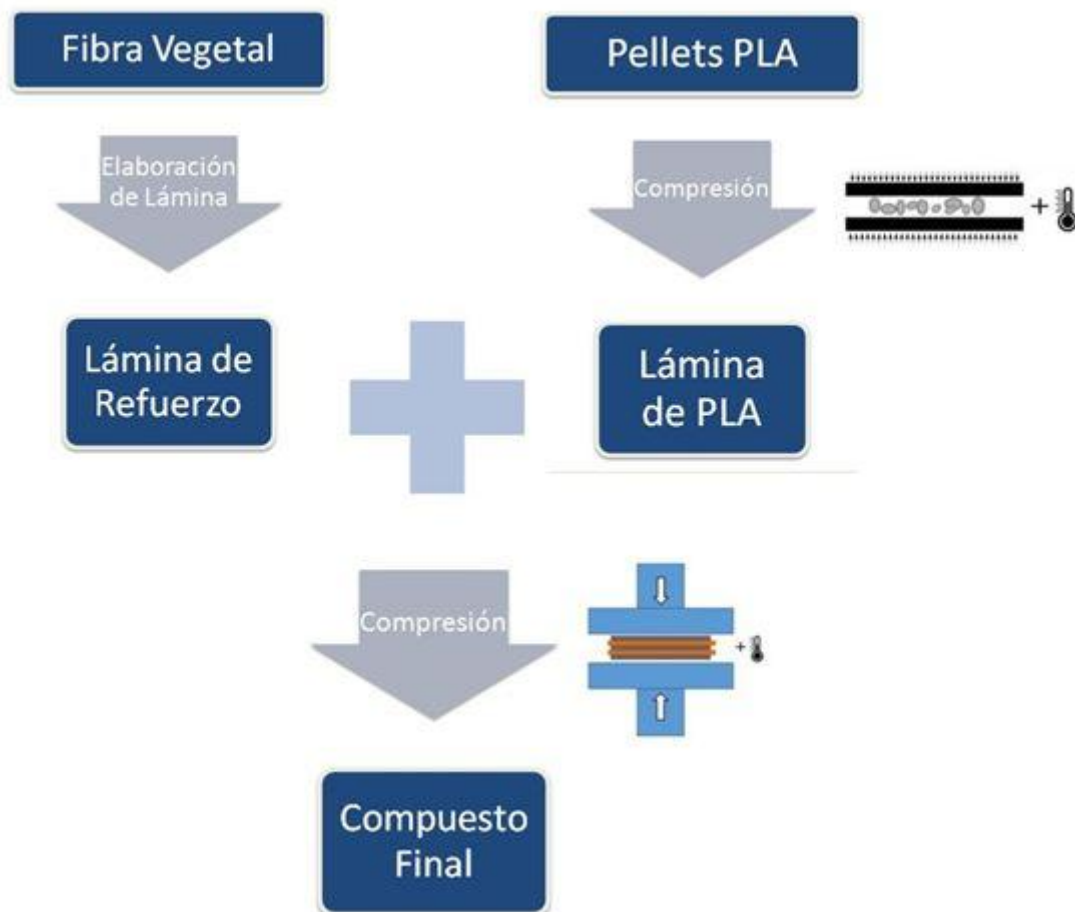


Figura 2. Esquema de proceso de fabricación mediante compresión con placas calefactoras.

A continuación se ofrece una pequeña descripción del tipo de matriz y refuerzo que tienen los materiales compuestos fabricados y estudiados:

- Matriz polimérica de PLA y refuerzo de fibras de lino dispuestas con orientación unidireccional.
- Matriz polimérica de PLA y refuerzo de fibras de lino en formato tejido.
- Matriz polimérica de PLA y refuerzo de fibras de esparto natural dispuestas con orientación unidireccional.
- Matriz polimérica de PLA y refuerzo de fibras de esparto sometidas a procesos de triturado y secado y dispuestas con orientación unidireccional.

3.1. EQUIPO REQUERIDO PARA LA FABRICACIÓN

La siguiente imagen muestra la disposición en la zona de trabajo de los principales equipos utilizados en el proceso de fabricación. Se localiza en la zona central la máquina de ensayos, con espacio suficiente en torno a esta para poder manipular los materiales que deben ser introducidos y extraídos del espacio entre los platos de compresión. A la izquierda se encuentra el ordenador desde el que se accede al software PCD2K con el que se controla la máquina. A la derecha, sobre la mesa junto a la máquina de ensayos, está el dispositivo de control de la temperatura de los platos de compresión.



Figura 3. Zona de trabajo y equipo utilizado en la fabricación.

MÁQUINA DE ENSAYOS UNIVERSAL

La máquina de ensayos universal constituye la principal máquina de trabajo en el proceso de fabricación, con ella se obtienen las láminas de PLA y los compuestos finales. Las principales operaciones ejecutadas con la máquina de ensayos para la obtención de las láminas y los compuestos son el precalentamiento y la aplicación de presión simultánea a la transferencia de calor efectuada por las placas calefactoras.

Esta máquina de ensayos es de la empresa española 'Servois', en concreto se trata de un modelo perteneciente a la serie MUE. Entre sus características técnicas destaca que permite ejecutar ensayos de tracción, compresión y flexión, pues puede incorporar todo tipo de

accesorios incluyendo el utillaje requerido para ejecutar los ensayos de compresión que atañen a este proyecto. Además permite trabajar con todo tipo de materiales, metales, plásticos, aislantes, caucho, materiales compuestos, biomateriales y la posibilidad de efectuar ensayos climatizados [32]. Su principio de funcionamiento es servo-hidráulico y tiene una capacidad de carga de hasta 900KN. La medida de fuerza se realiza con células de carga mientras que la medida de desplazamiento se realiza con un captador lineal SSI [32]. El utillaje que incorpora la máquina de ensayos para llevar a cabo la fabricación de los materiales compuestos incluye unos platos de compresión calefactores (el superior es móvil, mientras que el inferior es fijo) que utilizan un termopar para controlar la temperatura de trabajo y que están conectados a un control electrónico que permite manipular la temperatura de cada plato de forma independiente [32].

Para trabajar con la máquina de ensayos se requiere el software de control PCD2K que controla el grupo hidráulico y el grupo neumático de la máquina. El software permite configurar de forma personalizada cada ensayo ya que con él se controla tanto la posición relativa de los platos calefactores como la fuerza aplicada además de permitir ajustar funciones de fuerza y tiempo a cada ciclo.

DISPOSITIVO DE CONTROL AMBIENTAL

Como se ha comentado en apartados anteriores, es importante controlar las condiciones ambientales en las que se mantienen los productos naturales antes de su procesamiento para evitar que su contenido de humedad afecte a las propiedades del compuesto final. El dispositivo utilizado para ello permite mantener unas condiciones constantes del 46% de humedad relativa y 20°C. Este dispositivo se muestra en la siguiente imagen.



Figura 4. Dispositivo de control ambiental.

DISPOSITIVO PARA CONFORMAR LÁMINAS DE REFUERZO

Otra de las herramientas que han sido necesarias para la fabricación de las láminas de refuerzo es un dispositivo con forma de marco que gracias a un eje libre presenta giro relativo respecto a su superficie de apoyo. Este instrumento ha sido diseñado para conformar láminas de lino (con disposición unidireccional). En la siguiente imagen se muestra dicho dispositivo.



Figura 5. Dispositivo para conformar láminas de refuerzo unidireccional.

3.2. ELABORACIÓN DE LÁMINAS DE PLA

En todos los materiales compuestos estudiados en este trabajo el material que constituye la matriz es el mismo. Se trata de una resina termoplástica compuesta por moléculas de ácido láctico denominada PLA. Este material es un bioplástico de origen vegetal y su uso supone múltiples ventajas como la compatibilidad con la mayor parte de fibras naturales dada su temperatura de procesamiento; sus elevadas propiedades mecánicas y el bajo impacto ambiental frente a otros polímeros derivados del petróleo y su coste en comparación a otros bioplásticos. Estas consideraciones se han detallado con más detenimiento en el apartado de antecedentes.

Se puede disponer de diferentes tipos de PLA para la fabricación de los materiales compuestos mediante moldeo por compresión. Existen estudios previos que evalúan la aptitud de estos materiales frente a este tipo de procesos [18, 19]. Los tipos de PLA más relevantes en este sentido son el PLA 3260HP que destaca por su uso en procesos de extrusión para obtener productos finales como copas, platos y productos de cubertería, y el PLA 10361D cuyo uso es específico para procesos con fibras naturales. En dichos estudios ambos materiales fueron procesados bajo las mismas condiciones de presión y temperatura, los ensayos efectuados en dichos trabajos han revelado mayores propiedades mecánicas en el PLA 3260HP a pesar de que el PLA 10361D sea específico para el procesamiento con fibras naturales. El problema del material PLA 3260HP es que ofrece ciertos inconvenientes cuando el material compuesto se constituye por varias láminas de refuerzo. Este tipo de PLA no se difunde hacia las capas internas del compuesto, lo que provoca fallos en el impregnado de las fibras [18, 19]. Estos

estudios determinan por tanto que la mejor opción para procesados basados en el moldeo por compresión es el PLA 10361D.

El PLA en estado laminar es un componente indispensable en la fabricación de cualquier compuesto biodegradable analizado en este trabajo. El PLA es suministrado en estado granular (pellets) por la empresa Natureworks LLC, a continuación se detalla el proceso de elaboración de las láminas de bioplástico.

Para la obtención de estas láminas se hace uso de la máquina de ensayos universal. La operación consiste en un moldeo por compresión del producto PLA en estado granular mediante los platos calefactores.

La primera fase del proceso es la elaboración de los moldes. Dado que la elaboración de láminas de PLA es unitaria y no por lotes, y que el tiempo de producción unitario es de en torno a cuatro minutos, la producción de las láminas de PLA en cada jornada de trabajo es reducida. Por este motivo el uso de moldes desechables supone la solución de menor coste. El material que constituya los moldes requiere alta deformabilidad (que le permita generar las láminas del polímero con las formas deseadas), además debe ser capaz de resistir las condiciones de alta presión y temperatura del proceso (185°C y hasta 16MPa) y debe tener capacidad antiadherente frente al PLA para facilitar la extracción del molde. Dadas estas propiedades el material escogido es papel sulfurizado. El papel sulfurizado o papel vegetal se comercializa en tiendas de utensilios de cocina y supermercados dado su extendido uso culinario. Como ya se ha comentado, cada proceso de elaboración de láminas de PLA es unitario, por lo que en primer lugar se estudia qué geometría debe tener dicha lámina para conformar manualmente un molde adaptado a su geometría. Una vez el molde presenta la forma deseada se le confieren varios cortes con la función de permitir liberar el aire durante el ciclo de compresión, evitando de esta forma que la lámina de PLA obtenida contenga burbujas. Estos cortes además permiten que el PLA sobrante fluya en caso de exceso de material, evitando así que el molde se rompa durante el proceso.

La siguiente fase es introducir los pellets de PLA en el molde, para ello se hace uso de una balanza de precisión con la que determinamos el contenido exacto de cada molde. La masa de cada lámina de PLA depende de la geometría del molde y de la composición del compuesto final que queramos obtener. El proceso de elaboración de las láminas de PLA no está optimizado, se dan múltiples factores, como la aplicación de presión no uniforme por parte de las placas calefactoras, que hacen inevitables las pérdidas de material durante el proceso de compresión. Para compensarlas se introducen en cada proceso de laminado 0.3 g adicionales de PLA. Un molde genérico tiene forma de sobre, por lo que introducir los pellets consiste básicamente en desdoblar el molde e introducir el material granular.

A continuación se coloca el molde entre dos láminas de papel vegetal para evitar el contacto directo entre este y los platos calefactores, de esta forma el exceso de PLA no contacta con el utillaje de la máquina de ensayos y esta no se daña (esta medida de seguridad también se adopta en la fase de producción del compuesto). El molde, junto con las dos láminas adicionales de papel vegetal, se coloca entre los platos calefactores de la máquina de ensayos. Este paso requiere especial atención pues como se ha comentado previamente, las placas de compresión de la máquina se encuentran descompensadas, la experiencia durante la

fabricación ha demostrado que los pellets de PLA deben estar ligeramente descentrados respecto del centro del molde hacia la sección inferior y deben distribuirse de forma elíptica en su interior para garantizar la correcta adaptación al molde del material. Este proceso de colocación del molde en la máquina de ensayos debe realizarse una vez los platos calefactores de compresión hayan alcanzado la temperatura de procesado del PLA. Este paso precede a la aplicación de presión mediante la máquina de ensayos.

La aplicación de presión y temperatura de forma combinada es efectuada mediante la máquina de ensayos. Antes de iniciar el software de control PCD2K se procede a calentar las placas calefactoras. Los estudios realizados sobre matrices biodegradables, y ensayos previos con este material, han determinado que la temperatura del procesamiento (basado en moldeo por compresión) del PLA es de 185°C [18, 19, 20]. Para alcanzar esta temperatura en las placas de compresión, la máquina de ensayos cuenta con un dispositivo de control. El proceso que comprende desde el encendido del dispositivo y la selección de la temperatura, hasta que las placas alcanzan los 185°C tiene una duración de una hora y media.

Una vez alcanzada la temperatura de 185°C se procede al encendido de los grupos hidráulico y neumático de la máquina de ensayos para definir el parámetro de presión del proceso. Para ello se cuenta con el software PCD2K, con este paso se habilita la aplicación de presión por parte de la máquina. Se seleccionan los grupos de posición y fuerza, cuyo encendido permite conocer en todo momento el valor de estos parámetros. Se seleccionan también el grupo de control, que permite manipular los valores de posición y fuerza, y el grupo generador, que permite imponer funciones matemáticas en la aplicación de presión del proceso.

Antes de estudiar la presión del proceso es necesario que se haga un apunte en relación al tamaño de las láminas de PLA. Para las configuraciones de material compuesto que han sido analizadas se ha requerido dos tamaños distintos. Esto se debe a que el proceso no está optimizado. Tanto la maquinaria de la que se dispone para obtener las láminas del material de refuerzo, como el estado o modo de presentación de las fibras vegetales con las que se trabaja, han condicionado las dimensiones de dichas láminas.

Entre los materiales compuestos estudiados destaca una configuración en la que se trabaja el material de refuerzo en forma de tejido. Esta presentación de las fibras (tejido) permite conformar el compuesto final con láminas de PLA de dimensiones variables. Investigaciones previas (efectuadas con el mismo equipo) acerca de compuestos con refuerzo de tejido de lino y matriz laminar de PLA aportan las dimensiones óptimas de dichas láminas. Según estos proyectos las dimensiones de las láminas de tejido y las láminas de PLA deben ser 20x26cm y 16x20cm respectivamente [18].

Sin embargo, a parte de este caso, el resto de configuraciones de material compuesto estudiadas en este trabajo no están constituidas por las fibras tejidas. En el resto de configuraciones las fibras se disponen unidireccionalmente constituyendo láminas. El utillaje disponible para conformar las láminas con las fibras orientadas unidireccionalmente es limitado, por este motivo el tamaño de las láminas de refuerzo debe ajustarse a las dimensiones de las láminas de PLA. En estos casos dichas dimensiones se definen en base a la superficie de las placas calefactoras de la máquina de ensayos. El tamaño escogido para las láminas de estas configuraciones es 18x26cm.

De esta forma quedan definidas las dimensiones de las láminas de PLA que se requieren: 16x20cm y 18x26cm.

En cuanto al parámetro de presión. Los valores introducidos en la máquina se definieron a partir de investigaciones previas (en las que se contaba con el mismo equipo) en las que las láminas de PLA de las dimensiones descritas ya fueron fabricadas [18]. Estos valores deben ser introducidos en la máquina de ensayos en términos de fuerza lo que se corresponde a 58.84KN y 87.28KN para las láminas de dimensiones 16x20cm y 18x26cm respectivamente.

Conocidos los parámetros del proceso se define mediante el grupo generador del software la función matemática (representada por las variables de fuerza y tiempo) que controla la presión ejercida por la máquina. El proceso óptimo de manufacturación del PLA se alcanza con una relación lineal entre la fuerza y el tiempo del proceso, con una duración total del mismo de tres minutos y una ordenada en el origen de valor 0. La función se define dando los valores de fuerza máxima (58.84KN u 87.28KN, dependiendo de las dimensiones de la lámina) y pendiente. Para los moldes de dimensiones 16x20 cm y 18x26 cm la pendiente toma valor 0.327KN/s y 0.485KN/s respectivamente. La duración de tres minutos del proceso garantiza el flujo adecuado del material y permite obtener un producto laminar homogéneo. El uso de la función lineal y la duración del proceso han sido utilizados en estudios previos con éxito [18, 19].

Como se ha mencionado previamente, una vez definida la función que controla el proceso, se introduce el molde junto con los papeles adicionales de seguridad entre los platos calefactores. En este paso se debe advertir el peligro del contacto con las placas a alta temperatura. A continuación se pasa a manipular el grupo de posición del software para aproximar las placas calefactoras hasta que se detecta el contacto entre estas y el molde. Este contacto lo advierte el grupo de fuerza del software. Comprobado el contacto se inicia la función lineal generada para el proceso. La operación tiene una duración de tres minutos durante los cuales se debe verificar el correcto funcionamiento de la máquina. Transcurridos los tres minutos y alcanzada la fuerza máxima del proceso la máquina se detiene. Se vuelve entonces a manipular el grupo de posición para separar las placas calefactoras y poder retirar así el molde. El proceso de enfriamiento y solidificación del material tiene una duración de dos minutos en condiciones normales de 25°C y 1 atm, este proceso requiere una superficie plana que disipe el calor del material, en los ensayos se ha utilizado una placa de aluminio. Una vez la placa haya solidificado se puede manipular y extraer del molde. La extracción debe hacerse sin generar residuos del papel vegetal en el producto de PLA pues esto afectaría al comportamiento mecánico del compuesto final. Una vez se haya fabricado la lámina de PLA, se verifica que no contiene inclusiones de otros materiales; que no presenta un alto contenido de burbujas y que es un producto homogéneo. Tras realizar esta comprobación visual, la lámina se introduce en un dispositivo que mantiene las condiciones propicias para su conservación (figura 4) hasta que se efectúen los procesos de compresión que requieran su uso o su apilamiento con las láminas de refuerzo.

En los siguientes apartados se describe la elaboración de las láminas constituidas por fibras.

Las fibras son el componente de refuerzo del material compuesto, son determinantes para obtener buenas propiedades mecánicas. Tal y como se ha expuesto en los antecedentes, el uso

de fibras vegetales como refuerzo de los materiales compuestos supone múltiples ventajas en relación a los costes de sus procesos de producción, al impacto ambiental derivado de la producción de estas fibras, a la gestión de sus residuos y a la baja densidad que presentan frente a las fibras tradicionales.

En este proyecto se han caracterizado mediante ensayos de tracción materiales compuestos constituidos por distintos tipos de fibras vegetales. Todos los materiales compuestos han requerido la elaboración de láminas con las fibras. En los siguientes apartados se detallan los procesos de elaboración de estas láminas.

3.3. ELABORACIÓN DE LÁMINAS DE LINO

En el apartado de antecedentes se han expuesto las ventajas asociadas al uso del lino como material de refuerzo en los materiales compuestos biodegradables. Los métodos tradicionales de preparación de las fibras de lino han sido diseñados para aplicaciones textiles [33]. Estos métodos de preparación comienzan con la extracción de la fibra del núcleo leñoso de la planta. Este proceso se denomina enriamiento. A continuación se efectúa el espadillado, proceso que se realizó a mano hasta el siglo XIX a partir del cual comenzó a desarrollarse maquinaria para optimizar la producción. Con este proceso se eliminan las impurezas de la materia prima como restos del tallo o paja. Tras el proceso de espadillado se procede al peinado y doblamiento del material para darle forma de cinta. Esta cinta se vuelve más fina y homogénea durante el proceso de doblado hasta generar finalmente un producto que puede ser usado en procesos de hilado. Para aplicaciones textiles se requiere un hilado muy fino y estable, por lo tanto se usa un hilo con las fibras muy retorcidas [33].

No existe un proceso de preparación de lino optimizado para la industria de los materiales compuestos. Por este motivo, para su aplicación en dicha industria se debe recurrir al producto generado con los métodos de preparación de la industria textil. En el presente trabajo se evalúa el lino como material de refuerzo en diferentes estados. Estados por los que pasa siguiendo su ciclo de preparación para la industria textil.

Uno de los objetivos del trabajo es fabricar y caracterizar un compuesto constituido por láminas de refuerzo unidireccional de lino. Para constituir estas láminas de refuerzo se cuenta con lino en dos formatos distintos. Por un lado lino que se obtiene tras los procesos de enriamiento y espadillado. Este material se trabaja partiendo de una madeja de lino no hilado. En este caso se aplica un hilado manual para poder conformar posteriormente las láminas de refuerzo unidireccional. La segunda opción es lino procedente de un “roving”, es decir lino hilado industrialmente. La intención de fabricar y caracterizar compuestos con estos materiales es valorar como afecta el formato de lino a las características y propiedades del compuesto.

Por último se utiliza lino extraído de una bobina de tejido como material de refuerzo. Las capas de lino se cortan en formatos rectangulares y con las medidas adecuadas para la fabricación de cada pieza. Las fibras de lino en este formato ya han sido estudiadas en otros proyectos de investigación de materiales compuestos con buenos resultados frente a los compuestos basados en fibra de vidrio [34, 18, 19]. A continuación se detallan los procesos de elaboración de las láminas de fibra de lino en sus diferentes formatos.

3.3.1. LÁMINAS DE LINO HILADO MANUALMENTE

Un inconveniente de las fibras de lino extraídas directamente de la madeja y sin ser sometidas a procesos de hilado es la dificultad para procesarlas con los métodos de la industria de materiales compuestos. Métodos como la pultrusión dañan las fibras de lino sin hilar. Los únicos métodos que se conocen para su procesamiento son los basados en el preimpregnado de las fibras, y estos todavía están en desarrollo [33]. Los problemas derivados del procesamiento de las fibras de lino sin hilar han hecho que se decida trabajar con las fibras de lino hiladas. Existen investigaciones sobre el uso de lino en materiales compuestos que reflejan que cuanto menor sea el ángulo de hilado, mayores son las propiedades mecánicas del compuesto obtenido [33]. Asimismo estas investigaciones resaltan la necesidad de desarrollar tejidos de lino con bajos ángulos de hilado. El hilo de lino producido industrialmente presenta un elevado ángulo de hilado. Este ángulo se forma entre las fibras de la superficie del hilo y su dirección longitudinal. En la industria textil es importante producir hilos con un elevado ángulo de hilado para poder desarrollar tejidos de buenas propiedades. Uno de los objetivos de este trabajo es evaluar las características y propiedades de compuestos con refuerzo unidireccional de lino que no usen hilo producido industrialmente.

Debido a los medios que se han dispuesto para la fabricación, el hilo de lino se obtiene mediante un proceso manual. Para manipular las fibras de lino es preciso usar guantes de látex, esto evita que las fibras se contaminen, además facilita su manipulación. En primer lugar se debe extraer de la madeja la cantidad apropiada de lino, esta debe ser constante a lo largo de toda la longitud del hilo producido para poder fabricar un producto homogéneo. Los medios disponibles no permiten medir la cantidad de lino extraída de la madeja, por lo que dicha cantidad ha podido resultar variable durante la fabricación del hilo. Este factor ha resultado determinante en las propiedades de los materiales producidos, pues ha impedido la obtención de un producto homogéneo.

Una vez extraído el lino de la madeja se procede a su hilado, al no disponer del utillaje adecuado, como ruelas de hilado, esta operación se realiza manualmente. Primero se juntan las fibras que se han extraído de la madeja, la cohesión se consigue con un poco de fricción entre ellas. A continuación se retuercen hasta conseguir un diámetro y un ángulo de hilado uniforme con respecto al resto del hilo producido. Con los medios disponibles no ha sido posible realizar un control estricto del diámetro y del ángulo de hilado de los hilos. Estos problemas, combinados con la imposibilidad de medir la cantidad de fibras utilizada en cada hilado han resultado en un producto heterogéneo, factor que ha resultado determinante en las propiedades de los materiales producidos.

Este proceso se repite hasta obtener una bobina de hilo con la cantidad suficiente de material para conformar dos láminas de refuerzo unidireccional de dimensiones 18x26cm en el dispositivo con forma de marco descrito en apartados anteriores. Es importante mencionar que se probaron varios métodos para obtener las láminas con la orientación de los hilos deseada, uno de ellos fue el uso de tochos de acero para mantener el material a tracción y así evitar la pérdida de orientación de los hilos, sin embargo estos resultaron inútiles. Finalmente se desarrolló la idea de diseñar un dispositivo que pudiera sostener los hilos de lino bajo tensión y con la capacidad suficiente para obtener láminas de las dimensiones requeridas, se

trata del dispositivo con forma de marco descrito en anteriores apartados. El tiempo necesario para obtener la cantidad suficiente de hilo para conformar dos láminas de refuerzo de dimensiones 18x26cm es aproximadamente 27 horas con una persona trabajando en el proceso. Como se ha comentado, con esta cantidad de hilo se obtienen dos láminas de refuerzo tras preparar el hilo sobre el dispositivo con forma de marco. El proceso para preparar el hilo sobre el dispositivo tiene una duración media de 1 hora con una persona trabajando en el proceso. Tras preparar el hilo en el dispositivo es importante realizar una operación de cosido. Esta operación evita que los hilos de lino pierdan su orientación durante los ciclos de compresión, lo que afectaría a las propiedades del compuesto. Tras la operación de cosido la elaboración de las láminas de refuerzo unidireccional de lino ha finalizado, sin embargo manipular las láminas es complicado. Por eso, una vez el hilo está dispuesto en el dispositivo, se procede a su apilamiento con las láminas de PLA. Se cuenta para ello con un material adhesivo. Se trata de un material que ha sido utilizado en proyectos previos en los que se fabricaron compuestos con matriz de PLA y refuerzo de lino [18, 19]. Este material permite la unión de las láminas de lino con las láminas de PLA. Sobre los lados menores de las láminas de PLA se coloca una estrecha tira de cinta adhesiva, y una vez listas las láminas de PLA y el material adhesivo, se une a las láminas de hilo de lino que continúan en el dispositivo. Se usan dos láminas de PLA por cada lámina de lino. Tras unir las láminas se corta el lino restante del dispositivo y de esta forma se extraen las láminas de lino y PLA ya apiladas. A continuación se resumen las fases del proceso de elaboración de las láminas de lino hilado manualmente.

1. Hilado manual: Una persona tarda 27 horas en producir la cantidad de hilo necesaria para conformar dos láminas de refuerzo de dimensiones 18x26cm.
2. Disposición de hilo de lino en marco: Una persona tarda 1 hora en obtener dos láminas de hilo de lino con orientación unidireccional de dimensiones 18x26cm.
3. Cosido de láminas de lino unidireccionales: Una persona tarda 1 hora en obtener dos láminas de refuerzo unidireccional cosidas de dimensiones 18x26cm.
4. Proceso de apilamiento de láminas de PLA con las láminas de lino y extracción del dispositivo: Esta fase requiere cuatro láminas de PLA de dimensiones 18x26cm y material adhesivo. Una persona trabajando en esta fase tarda 10 minutos en extraer dos componentes de dimensiones 18x26cm. Cada componente está constituido por dos láminas de PLA apiladas con una lámina de lino unidireccional.

3.3.2. LÁMINAS DE LINO CON HILADO INDUSTRIAL

Uno de los formatos tradicionales del lino en su preparación para la industria textil es en bobinas de hilo. La dificultad para producir hilo de lino manualmente con los medios disponibles y la necesidad de producir un gran número de materiales compuestos con refuerzo unidireccional, han motivado la producción de láminas de refuerzo unidireccional con lino hilado industrialmente.

Contar con lino hilado industrialmente permite analizar la influencia de algunos parámetros del proceso de fabricación en las características y propiedades del compuesto. Esto es posible gracias a los bajos tiempos de fabricación que conlleva el uso de este material.

La elaboración de las láminas de lino unidireccionales a partir de lino hilado industrialmente es sencilla. Sus fases coinciden con las del proceso a partir de lino hilado manualmente. Se

dispone el hilo en el dispositivo con forma de marco, configurado para obtener láminas de refuerzo de dimensiones 18x26cm. Una vez el hilo de lino está dispuesto en el dispositivo se procede al cosido de las láminas. Después se adhieren las láminas de PLA al lino que permanece en el dispositivo mediante el material adhesivo. Finalmente se extraen los componentes del dispositivo tras cortar y retirar el exceso de lino.

La última fase de apilamiento y extracción del dispositivo requiere cuatro láminas de PLA de dimensiones 18x26cm. Tras esta fase se obtienen dos componentes de dimensiones 18x26cm. Cada componente está constituido por dos láminas de PLA apiladas con una lámina de lino unidireccional.

El tiempo y la mano de obra que requiere esta elaboración son iguales a los requeridos por las fases 2, 3 y 4 de la elaboración de capas de lino hilado manualmente.

3.3.3. LÁMINAS DE LINO TEJIDO

El uso de tejidos de lino procedentes de la industria textil como refuerzo de materiales compuestos ha sido analizado en otras investigaciones. Su uso ha destacado por las altas propiedades de los materiales obtenidos frente a los compuestos basados en fibra de vidrio, especialmente en comparación a las propiedades específicas de los compuestos con refuerzo de fibra de vidrio [34].

Las láminas de tejido de lino se extraen de una bobina de tejido de 10 m y se cortan con las medidas adecuadas para la fabricación de cada pieza. El tiempo de elaboración de las láminas de lino tejido es despreciable frente al tiempo de elaboración de láminas con refuerzo unidireccional de lino. Se estima que el tiempo de elaboración de una lámina de tejido es de 5 minutos con una persona trabajando en el proceso.

Se toma tejido de lino con dos dimensiones. Se escogen por un lado láminas de tejido de 18x26cm. Las láminas de estas dimensiones se combinan en las siguientes fases con láminas de PLA de dimensiones 18x26cm. Se escogen estas dimensiones de las láminas de tejido para fabricar el compuesto en un proceso similar al utilizado para fabricar los compuestos con refuerzo de lino unidireccional. Por otro lado se fabrican compuestos siguiendo un proceso desarrollado en proyectos previos [18, 19]. Estos productos se basan en láminas de tejido de lino de dimensiones 20x26cm y en láminas de PLA de dimensiones 16x20cm. La intención de fabricar compuestos con tejido de lino de dos dimensiones distintas es comparar el proceso de fabricación desarrollado en proyectos previos con el escogido en este trabajo. Por tanto las dimensiones de las láminas de tejido de lino utilizadas en este trabajo son 18x26cm y 20x26cm.

3.4. ELABORACIÓN DE LÁMINAS DE ESPARTO

El esparto es una planta mediterránea cuya mayor área de expansión se halla en África del norte, también es destacada el área que abarca en la península ibérica, preferentemente en el ángulo suroriental. En lo relativo a sus aplicaciones, dado el alto contenido en celulosa se trata de un material utilizado en la fabricación de papel, también es utilizado en la industria textil

para la obtención de artilleras (un tipo de tejido). La preparación de la fibra consiste en los procesos de picado, rastillado e hilado [35]. Las fibras de esparto no han sido tan ampliamente estudiadas en las investigaciones sobre compuestos biodegradables como otras fibras vegetales (lino, yute, kenaf). Por este motivo y dadas sus áreas de producción, se ha decidido estudiar esta fibra como refuerzo de materiales compuestos fabricados por compresión.

Existen investigaciones sobre materiales compuestos con refuerzo de esparto. Las fibras utilizadas en estos estudios se obtienen mediante procesos de cocción y el uso de desfibradores. En estos proyectos el material compuesto se obtiene por extrusión e inyección, por este motivo se requieren las fibras del esparto y no sus tallos o hilos obtenidos a partir de las fibras [36]. Sin embargo, para los procesos de compresión ejecutados con la máquina de ensayos se requiere el esparto constituyendo láminas. Tal y como ocurre con el lino, trabajar las fibras del esparto supone muchos problemas para constituir estas láminas. Por ello es necesaria la cohesión de las fibras para generar hilos que puedan alinearse formando capas. Dada la complejidad de los procesos de hilado con fibras de esparto se decide trabajar directamente con sus tallos.

En este trabajo se evalúan como material de refuerzo dos tipos de tallos. El primer tipo lo constituyen tallos que han sido sometidos a un proceso de secado y posteriormente han sido triturados. El segundo tipo se constituye de tallos procedentes de esparto en bruto. A continuación se describe la elaboración de las láminas de esparto. Se debe destacar que esta elaboración es igual para los dos tipos de tallo estudiados.

Uno de los factores principales en la elaboración de las láminas de esparto es que los tallos mantengan su orientación durante todo el proceso hasta que finalice el apilamiento con las láminas de PLA, en ese punto el material adhesivo dispuesto sobre el PLA mantiene los tallos en una posición adecuada.

El proceso requiere dos superficies elevadas y separadas entre sí de tal forma que la distancia entre ellas contenga una superficie mayor a 18x26cm. Las superficies deben estar elevadas una altura que permita manipular y apilar las láminas de PLA y esparto (10cm resulta suficiente). Por todo ello se han empleado dos prismas rectangulares de acero de dimensiones 30x10x10cm. Las características de las fibras de esparto y los medios disponibles han obligado a que las dimensiones de las láminas de PLA coincidan con las de las láminas de esparto. Como se ha explicado en anteriores apartados las dimensiones de las láminas (18x26cm) se han escogido en base a las dimensiones de las placas calefactoras.

Las piezas prismáticas se apoyan sobre sus superficies mayores y se colocan paralelas respecto de sus lados mayores a una distancia de 22cm. De esta forma se genera un volumen vacío entre las piezas de dimensiones 22x30x10cm. Se coloca material adhesivo sobre las superficies superiores de las piezas de acero para mantener los tallos en la posición deseada. A continuación se colocan los tallos uno a uno hasta completar las láminas de esparto con las dimensiones descritas. La elaboración de una lámina de esparto tiene una duración aproximada de 20 minutos con una persona trabajando en el proceso.

3.5. MOLDEO POR COMPRESIÓN DE COMPUESTOS CON REFUERZO UNIDIRECCIONAL DE LINO

Esta fase del proceso de fabricación es igual para los compuestos con refuerzo de lino hilado manualmente e industrialmente. Se parte de los componentes de tres capas extraídos del dispositivo con forma de marco. La disposición de las láminas de estos componentes es la siguiente:

Lámina PLA 18x26cm + Lámina de lino unidireccional 18x26cm + Lámina PLA 18x26cm

Se requiere un ciclo de compresión por cada componente que constituya el material compuesto y un ciclo de compresión adicional para unir todos los componentes y obtener el compuesto final. Todos los ciclos de compresión ejecutados para la obtención de un material compuesto se realizan con el mismo parámetro de presión. Es importante mencionar que entre los objetivos de este trabajo está analizar la influencia de una serie de parámetros del proceso de fabricación en las características y propiedades de los compuestos producidos. La presión es uno de estos parámetros, por este motivo su valor en los ciclos de compresión para producir los compuestos se detalla en el apartado de resultados.

Cada ciclo de compresión es ejecutado con la máquina de ensayos. La temperatura de los platos calefactores es de 185 °C, la misma que se requiere para la fabricación de las láminas de PLA. El manejo del dispositivo de control de temperatura se ha detallado en apartados anteriores. Para controlar la aplicación de presión se inicia el software PCD2K tal y como se ha detallado en el apartado de fabricación de láminas de PLA. Cada ciclo consta de dos fases consecutivas. Estas fases ya han sido evaluadas en otros proyectos de investigación sobre materiales compuestos dando reducidos tiempos de fabricación de compuestos con altas propiedades [18, 19].

La primera fase es un precalentamiento de dos minutos de duración. Se introduce el componente entre los platos calefactores junto con dos láminas de papel vegetal que impiden el contacto directo entre el material y la máquina de ensayos. Con el componente correctamente colocado se manipula el grupo de posición del software para aproximar las placas calefactoras hasta que se detecta el contacto entre estas y el componente. El precalentamiento consiste en mantener la presión que garantiza dicho contacto mediante el grupo de posición durante dos minutos.

En la segunda fase se hace uso del grupo generador del software para definir una función lineal de tres minutos de duración con ordenada de valor cero. La fuerza máxima depende del parámetro de presión del proceso y de la superficie máxima del componente. La presión es uno de los parámetros que se analizan en apartados posteriores. La superficie máxima de cada componente determina la superficie de contacto entre el componente y los platos calefactores de la máquina. Conocido el parámetro de presión y la superficie de contacto se calcula la fuerza máxima y se introduce en el grupo generador junto con la pendiente que se calcula conocida la duración y la fuerza máxima del proceso.

Finalizadas las dos fases se hace uso del grupo de posición del software para separar las placas calefactoras y poder extraer el compuesto de la máquina de ensayos. El proceso de

enfriamiento y solidificación del material tiene una duración de cinco minutos en condiciones normales de 25°C y 1 atm, este proceso requiere una superficie plana que disipe el calor del material, para ello se ha utilizado una placa de aluminio. Una vez el compuesto haya solidificado se puede manipular, es entonces cuando se retiran las dos láminas de papel vegetal. Estas láminas se deben retirar sin generar residuos en el producto pues esto afectaría a su comportamiento mecánico.

Si el ciclo de compresión se aplica a los componentes extraídos directamente del dispositivo con forma de marco, se debe retirar el material adhesivo del compuesto, para ello se cuenta con una guillotina de mesa semi-industrial. Si el ciclo se aplica a varios componentes apilados a los que previamente ya se ha sometido a un ciclo de compresión propio, el producto obtenido no presenta restos de material adhesivo.

Finalizados todos los ciclos de compresión requeridos, el compuesto se deposita en el dispositivo que asegura su conservación en las condiciones adecuadas. Permanecerá en este dispositivo hasta que se ejecute el ensayo de tracción.

3.6. MOLDEO POR COMPRESIÓN DE COMPUESTOS CON REFUERZO DE LINO TEJIDO

Las dimensiones de las láminas de tejido de lino utilizadas en este trabajo son 18x26cm y 20x26cm.

A continuación se describen las fases relativas al moldeo de los compuestos con láminas de tejido de dimensiones 18x26cm. El moldeo se realiza en tres ciclos de compresión ejecutados con la máquina de ensayos. La fabricación de los compuestos con tejido de lino de estas dimensiones está basada en el proceso desarrollado para la fabricación de los compuestos con láminas de refuerzo unidireccional, esto se describe más detalladamente en el apartado de resultados.

Mediante dos ciclos de compresión se obtienen dos compuestos con la siguiente disposición de las láminas:

Lámina PLA 18x26cm + Lámina de lino tejido 18x26cm + Lámina PLA 18x26cm

El tercer ciclo se aplica sobre los dos componentes apilados para generar el compuesto final. El parámetro de presión se detalla en apartados posteriores.

En lo relativo a los dos primeros ciclos. En primer lugar se alinean las tres láminas, una vez apiladas, se colocan entre dos láminas de papel vegetal que evitan el contacto directo con los platos calefactores. A continuación se introducen las láminas entre los platos calefactores, este paso requiere especial atención, pues una colocación inadecuada de las láminas de lino respecto a las láminas de PLA supondría una mala distribución del bioplástico (PLA) en el proceso. En este punto se procede al uso del software de control de la máquina de ensayos. El ciclo de compresión se realiza en dos fases consecutivas, precalentamiento y aplicación de presión. Ambas han sido detalladas en la fabricación de los compuestos con refuerzo unidireccional y su duración total es de cinco minutos. Finalizadas las dos fases, se extrae el compuesto junto con las láminas de papel vegetal y se deposita en una placa de aluminio

sobre la que se enfría y solidifica en cinco minutos. Transcurrido este tiempo se retiran las láminas de papel vegetal y se guarda el compuesto en el dispositivo de conservación mientras se fabrica el segundo componente en otro ciclo idéntico al descrito.

Una vez han solidificado los dos componentes que van a constituir el material compuesto, se colocan entre dos láminas de papel vegetal, se introducen entre los platos calefactores de la máquina y se ejecuta el tercer ciclo de compresión. Una vez finalizado, se extrae el producto de la máquina y se esperan cinco minutos para que enfríe y solidifique.

El compuesto final se introduce en el dispositivo de conservación. Al igual que los materiales compuestos basados en refuerzo unidireccional, el material permanece en este dispositivo hasta que se realice el ensayo de tracción.

Antes de exponer los detalles del moldeo del compuesto con láminas de tejido de dimensiones 20x26cm se describen las fases precedentes del proceso. Como ya se ha comentado, el proceso de fabricación empleado para estos compuestos ha sido desarrollado en investigaciones previas. Este proceso destaca por las bajas pérdidas de PLA que supone. Además, los compuestos fabricados siguiendo este proceso destacan por sus altas propiedades.

El compuesto consta de cuatro láminas de lino de las dimensiones dadas y cinco láminas de PLA de dimensiones 20x16cm. En primer lugar se juntan las cuatro capas (láminas) de lino y se cosen con alambre tres de los cuatro lados de las telas. A través del lado libre se introducen las láminas de PLA entre las capas de lino (una capa de lino en cada espacio). El apilamiento finaliza tras colocar una lámina de PLA sobre la capa superior de lino otra bajo la capa inferior y una vez es cosido con alambre el lado libre. Coser con alambre las telas minimiza las pérdidas de material bioplástico durante el ciclo de compresión. Sin embargo el uso de alambres solo es posible cuando las láminas de bioplástico tienen un tamaño menor a las láminas de tejido. Por este motivo no se han podido usar en la otra configuración de material compuesto con tejido de lino. El proceso de fabricación finaliza con la aplicación de un ciclo de compresión que consta de las dos fases que ya han sido descritas (precalentamiento y aplicación de presión).

Las láminas apiladas se colocan entre dos láminas de papel vegetal para evitar el contacto directo entre el material y la máquina de ensayos, después se colocan entre los platos calefactores. En este punto se inicia el ciclo de compresión, los parámetros que intervienen en este están descritos en los proyectos que han desarrollado el proceso [18, 19]. La presión del ciclo toma valor 16MPa, que se traduce en una fuerza máxima de valor 813.95KN dada la superficie máxima de los componentes apilados. Transcurridos los cinco minutos de duración del ciclo, se extrae el material de la máquina de ensayos y se deposita sobre una placa de aluminio durante cinco minutos, tiempo en que se enfría y solidifica. Transcurrido este tiempo se retiran las láminas de papel vegetal y se extraen los retenedores con unos alicates. El material se deposita en el dispositivo de conservación hasta que se inicia el ensayo de tracción.

3.7. MOLDEO POR COMPRESION DE COMPUESTOS CON REFUERZO DE ESPARTO

Antes de describir la fase de compresión deben exponerse unos pasos intermedios desde que se conforman las láminas de esparto. Los materiales compuestos basados en refuerzo de

esparto se han caracterizado principalmente para analizar el efecto de la composición del compuesto en sus características y propiedades mecánicas. Debido a los medios disponibles y al tiempo dispuesto, la composición del compuesto se ha modificado mediante la proporción del número de láminas de refuerzo frente al número de láminas de PLA. A continuación se describe como se han dispuesto las láminas en las muestras fabricadas con refuerzo de esparto.

- PLA /Esparto/PLA/Esparto/PLA
- PLA /Esparto/Esparto/PLA /Esparto/Esparto/PLA
- PLA /Esparto/Esparto/Esparto/PLA
- PLA /Esparto/ Esparto / Esparto / Esparto /PLA

La fase de apilamiento de las láminas se realiza con el material adhesivo. Se debe destacar que hasta que no se apilen todas las láminas de PLA las láminas de esparto deben permanecer unidas mediante el material adhesivo a las piezas prismáticas de acero para mantener la orientación de los tallos. Es decir, las láminas intermedias de PLA del compuesto se intercalan con las láminas de esparto mientras estas permanecen unidas a las piezas prismáticas.

La fase de apilamiento finaliza al colocar las dos últimas láminas de PLA. Una sobre la superficie superior y otra bajo la superficie inferior del material con el resto de láminas ya apiladas. Sobre estas dos láminas de PLA se colocan tiras de material adhesivo que permiten mantener la orientación de los tallos superficiales tras separar el material de las piezas de acero. Para mantener todos los tallos en la posición deseada es necesario mantener el material bajo presión hasta que se efectúe la compresión con la máquina de ensayos. Para ello se protege el material con dos láminas de papel vegetal y se coloca un peso sobre éste.

La fase de compresión mediante la máquina de ensayos es igual a la que se ha descrito para la fabricación de materiales compuestos basados en refuerzo de lino. Consta de una fase de precalentamiento (dos minutos) y otra de aplicación de presión (tres minutos). El parámetro de presión del ciclo es introducido en base al valor que optimiza la fabricación del material compuesto con refuerzo de lino unidireccional. Este parámetro es analizado en apartados posteriores. Conocida la presión y la superficie total del compuesto producido, se define la fuerza máxima ejercida por la máquina durante la fase de aplicación de presión y por tanto la pendiente de la función lineal (tres minutos de duración).

Transcurridos los cinco minutos que duran las dos fases, se extrae el material de la máquina de ensayos y se deposita sobre una lamina de aluminio durante cinco minutos, tiempo en que se enfría y solidifica. Tras los cinco minutos se retiran las láminas de papel vegetal y se eliminan los restos de material adhesivo haciendo uso de la guillotina. El material se deposita en el dispositivo de conservación hasta que se inicia el ensayo de tracción.

3.8. ENSAYOS DE TRACCIÓN

Los materiales compuestos resultantes se ensayaron a tracción para caracterizar sus propiedades mecánicas, resistencia máxima, deformación de rotura y módulo de Young. Para ello, las muestras de material compuesto se deben recortar en piezas rectangulares de dimensiones 120x20mm a las que se aplica un proceso de lijado que garantiza su adecuado acabado superficial. Es importante tomar medidas de largo, ancho, espesor y masa de cada pieza para poder procesar los datos extraídos tras el ensayo. Para efectuar estos ensayos se hizo uso de una máquina universal 'Instron 8516'.

Las probetas deben colocarse entre las mordazas de la máquina de ensayos que ejercen una presión de 20 bares. La distancia entre la mordaza superior e inferior es de 55mm que se corresponde con el parámetro de longitud inicial del material ensayado. Una vez se coloca la probeta entre las mordazas, es necesario ajustar la posición relativa de las mismas para eliminar la precarga ejercida sobre el material ensayado, esta carga surge durante la colocación del material en la máquina. Tras eliminar esta carga se hace uso del software de control de la máquina para iniciar el ensayo de tracción, éste se configura con una velocidad de 1mm/min.

El software de la máquina reporta los datos correspondientes a la curva fuerza-desplazamiento. Estos datos se procesan junto con las medidas de ancho, espesor y longitud inicial de cada probeta (medidos antes del ensayo) para obtener las curvas de tensión-deformación de cada pieza.

4. RESULTADOS

Tras la fabricación de los compuestos y una vez efectuados los ensayos de tracción, se recopilan los datos de dichos ensayos. En este capítulo se procesan los datos extraídos de los ensayos para obtener información relativa a las propiedades mecánicas de los compuestos y poder analizarla junto con otras características de los materiales obtenidos tras el proceso de fabricación. A continuación se resumen los principales puntos de este apartado:

- Dado el bajo tiempo de producción de los compuestos con refuerzo de lino hilado industrialmente, fue posible fabricar este tipo de material bajo diferentes condiciones y gracias a ello se ha podido analizar la influencia de los principales parámetros del proceso en los compuestos obtenidos.
- Los compuestos con refuerzo unidireccional de lino hilado manualmente fueron fabricados utilizando los parámetros óptimos del proceso utilizado para los compuestos con refuerzo de lino hilado industrialmente. Los datos extraídos de los ensayos han sido procesados. Posteriormente se ha estudiado la información relativa a las propiedades mecánicas de estos compuestos junto con otras características de los materiales fabricados.
- En cuanto a los compuestos con refuerzo de lino tejido. Se fabricaron dos muestras siguiendo dos procesos de fabricación distintos. Se han procesado los datos extraídos de los ensayos y se ha estudiado la información relativa a las propiedades mecánicas de los compuestos junto con otras características de los materiales obtenidos. Con estos estudios se han comparado ambos procesos con el objetivo de definir posibles mejoras en los mismos.
- En cuanto a los compuestos con refuerzo unidireccional de esparto. Se fabricaron muestras utilizando diferentes tipos de tallo y modificando ciertos parámetros del proceso de fabricación. Se han procesado los datos extraídos de los ensayos. Posteriormente se ha estudiado la información relativa a las propiedades mecánicas de los compuestos junto con otras características de los materiales obtenidos para analizar la influencia de dichos parámetros en los compuestos fabricados.

4.1. REFUERZO DE LINO UNIDIRECCIONAL HILADO INDUSTRIALMENTE

Las ventajas relativas a la producción del compuesto con refuerzo unidireccional de lino hilado industrialmente permiten fabricar un alto número de muestras de este compuesto. Este hecho hace posible fabricar el compuesto bajo diferentes condiciones, condiciones que se definen mediante los parámetros de temperatura, presión, composición y número de láminas de refuerzo. La caracterización de las propiedades mecánicas de las muestras, resistencia máxima, deformación de rotura y módulo de Young permite determinar los parámetros óptimos del proceso de fabricación, aquellos asociados a las muestras con mayores propiedades mecánicas.

En los siguientes apartados se aporta información relativa a los principales parámetros de fabricación y se analiza la influencia de los mismos en los productos obtenidos. Es importante destacar que los datos extraídos de las curvas de fuerza y posición generadas por la máquina

de ensayos han sido procesados mediante la herramienta de software Matlab y con la aplicación de cálculo Excel.

4.1.1. PARÁMETRO DE TEMPERATURA

El parámetro de temperatura en el proceso de moldeo por compresión de compuestos de matriz de PLA 10361D y refuerzo de lino se ha analizado en estudios previos [18, 19]. En estos se evalúa el efecto de la temperatura desde 175°C hasta 200°C. A temperaturas próximas a los 200°C las fibras vegetales se dañan por sobrecalentamiento, mientras que a temperaturas cercanas a 175°C el PLA no se funde completamente. Estos proyectos destacan que las muestras obtenidas con temperaturas entre 180°C y 185°C presentan mayor resistencia a tracción, además añaden que las muestras obtenidas con temperaturas comprendidas entre 175°C y 180°C tienen mayor riesgo de sufrir delaminación. Por estos motivos se ha decidido fabricar todas las muestras de este trabajo con una temperatura de 185°C, al resultar esta óptima para el proceso de moldeo por compresión y los materiales utilizados.

4.1.2. PARÁMETRO DE PRESIÓN

En relación a la presión, lo más destacado de este parámetro es analizar cómo influye en las fibras de refuerzo. Se ha demostrado en otros proyectos que existe un amplio rango de presiones para el proceso de moldeo por compresión de compuestos biodegradables que permite obtener materiales con propiedades mecánicas similares. Sin embargo estos proyectos analizan compuestos con refuerzo basado en tejido de lino, no con refuerzo unidireccional [18, 19]. Los resultados de estas investigaciones determinan que el proceso óptimo de fabricación se alcanza para presiones comprendidas entre 8MPa y 32MPa. Otros estudios demuestran que para presiones próximas a 32MPa se produce la rotura de las fibras de lino, en estos el parámetro de presión es acotado entre 8MPa y 16MPa [18]. No obstante estas investigaciones se han realizado también sobre materiales compuestos con refuerzo basado en tejido de lino. El inconveniente que presenta trabajar con refuerzo unidireccional de lino es que ejecutar el proceso a altas presiones conlleva que los hilos pierdan su orientación, lo que resulta determinante para las propiedades finales del compuesto. Por este motivo se decidió evaluar el parámetro de presión a valores inferiores a 16MPa. Para ello se fabricaron dos muestras bajo las mismas condiciones de temperatura, número de láminas de refuerzo y composición. La composición de las muestras depende de la masa de lino y PLA que estas presentan. Para calcular la masa de las láminas de lino se tomaron varias muestras para obtener un valor promedio de la densidad superficial de lámina de lino. Esta resultó en un valor de $4.88 \text{ e-}4 \text{ (g/mm}^2\text{)}$. La masa de las láminas de lino de dimensiones 18x26cm es por tanto 22.84g. Por otro lado, cada lámina de PLA de estas muestras tiene una masa de 15g. Las muestras estudiadas, junto con las gráficas obtenidas tras procesar los datos de los ensayos, se detallan a continuación.

Muestra 1.**Material de refuerzo:** Lino con hilado industrial.**Temperatura:** 185°C**Presión:** 4MPa**Número de capas:** Cuatro láminas de refuerzo.**Tipo de matriz:** Láminas de PLA intercaladas.**Porcentaje teórico de masa de refuerzo:** Contenido teórico de 43.22% de lino.**4MPa (PLA 15g/Lino unidireccional/PLA 15g) x4**

La muestra se constituye de cuatro componentes cada uno de los cuales está formado por una lámina de lino unidireccional y dos láminas de PLA. Cada lámina de lino unidireccional tiene una masa de valor 22.84g y cada lámina de PLA tiene una masa de valor 15g.

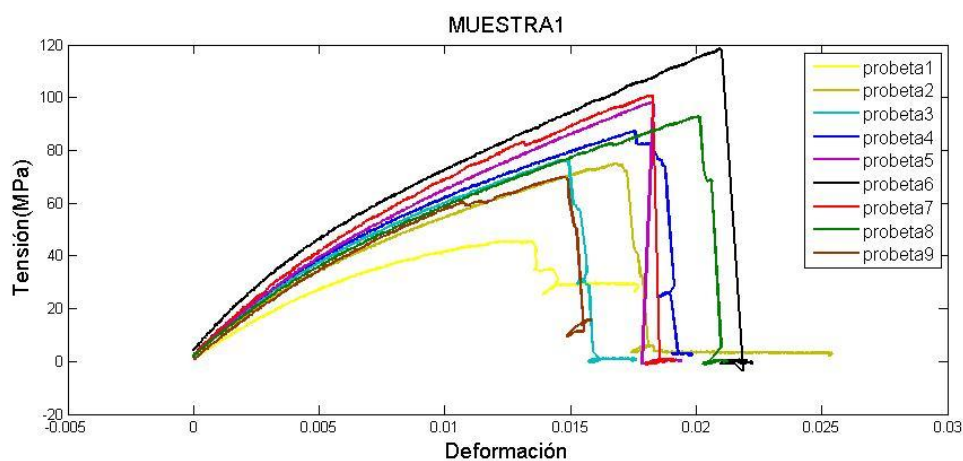


Figura 6. Diagramas tensión-deformación de las probetas de la muestra 1.

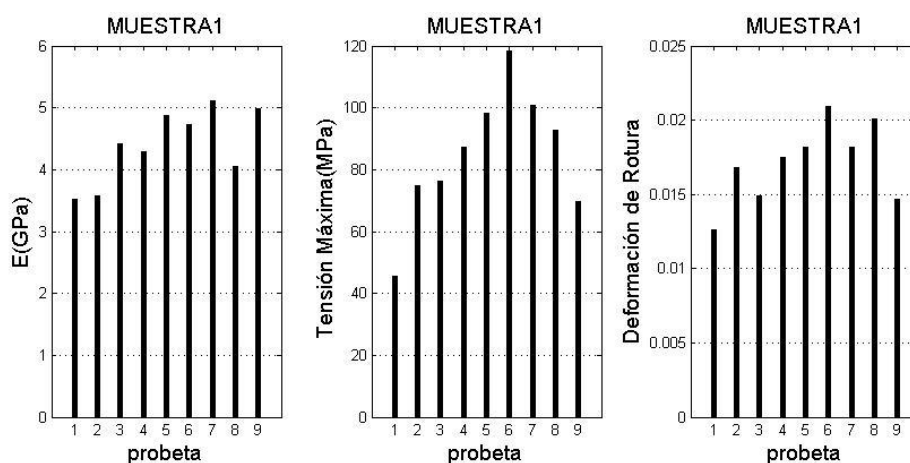


Figura 7. Representación gráfica de módulo de Young, tensión máxima y deformación de rotura de las probetas de la muestra 1.

Tabla 12. Datos estadísticos de las propiedades mecánicas de las probetas de la muestra 1.

Datos estadísticos	Módulo de Young(GPa)	Tensión Máxima(MPa)	Deformación de Rotura
Valor Máximo	5.12	118.30	0.021
Media	4.39	84.88	0.017
Desviación Estándar	0.59	21.11	0.0027
Coefficiente de Variación(adimensional)	0.13	0.25	0.16

Muestra 2.**Material de refuerzo:** Lino con hilado industrial.**Temperatura:** 185°C**Presión:** 8MPa**Número de capas:** Cuatro láminas de refuerzo.**Tipo de matriz:** Láminas de PLA intercaladas.**Porcentaje teórico de masa de refuerzo:** Contenido teórico de 43.22% de lino.**8MPa (PLA 15g/Lino unidireccional/PLA 15g) x4**

La muestra se constituye de cuatro componentes cada uno de los cuales está formado por una lámina de lino unidireccional y dos láminas de PLA. Cada lámina de lino unidireccional tiene una masa de valor 22.84g y cada lámina de PLA tiene una masa de valor 15g.

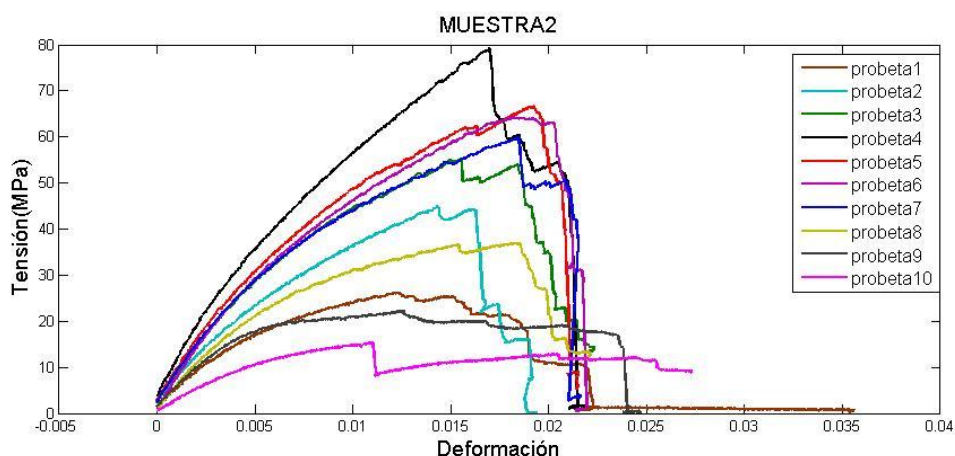


Figura 8. Diagramas tensión-deformación de las probetas de la muestra 2.

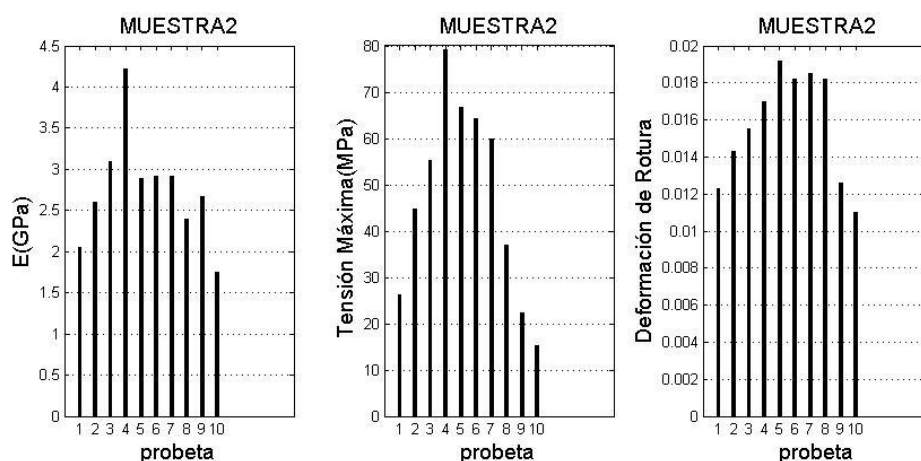


Figura 9. Representación gráfica de módulo de Young, tensión máxima y deformación de rotura de las probetas de la muestra 2.

Tabla 13. Datos estadísticos de las propiedades mecánicas de las probetas de la muestra 2.

Datos estadísticos	Módulo de Young(GPa)	Tensión Máxima(MPa)	Deformación de Rotura
Valor Máximo	4.22	79.17	0.019
Media	2.75	47.07	0.016
Desviación Estándar	0.67	21.34	0.0030
Coefficiente de Variación(adimensional)	0.24	0.45	0.19

Los resultados reflejan la diferencia entre las muestras en términos de rigidez y tensión máxima. Por otro lado la deformación de rotura es similar en los dos casos. Cabe destacar además las diferencias entre los coeficientes de variación de ambas muestras, en el caso del módulo de Young se aprecia una diferencia del 11% a favor de la muestra fabricada a baja presión, mientras que en el caso de la tensión máxima esta diferencia asciende hasta el 20%, también a favor de la muestra fabricada a baja presión. Este dato estadístico al que se recurre como medida de variabilidad indica que el parámetro de presión puede afectar a la homogeneidad de la muestra producida.

También es interesante la diferencia entre los coeficientes de variación de los datos (módulo de Young, tensión máxima, deformación de rotura) en las dos muestras se puede apreciar que en términos de tensión máxima este dato estadístico (coeficiente de variación) es superior al obtenido para el módulo de Young y la deformación de rotura. Para la muestra producida a 4MPa la diferencia promedio del coeficiente de variación entre la tensión máxima y los datos deformación de rotura, módulo de Young es del 10.50%, mientras que para la muestra fabricada a 8MPa la diferencia promedio es del 23.50%. En el estudio de cada una de los datos

(módulo de Young, tensión máxima, deformación de rotura) la distribución de valores en la muestra es similar y puede responder a las mismas causas. El dato de tensión máxima es el que mejor refleja dicha distribución al tener esta medida el coeficiente de variación más destacado. La distribución puede deberse a condiciones propias del proceso de fabricación como la presión ejercida por las placas calefactoras sobre el material fabricado. Esta no es uniforme debido a defectos presentes en el utillaje de la máquina, lo que puede resultar en una distribución no uniforme del material bioplástico en el compuesto. La aplicación de presión no uniforme puede generar a su vez diferencias en la orientación de las fibras según la zona de la muestra analizada. Como consecuencia, tal y como reflejan las gráficas, las probetas extraídas de la zona media de la muestra soportan tensiones mayores que las extraídas de los extremos. En el apartado de composición se incluyen las gráficas que reflejan estos fenómenos, además se estudia el efecto de la orientación de las fibras en el modo de fallo del material y en sus propiedades.

La muestra fabricada bajo una presión de 4MPa destaca frente a la producida a alta presión pues ha llegado a alcanzar un módulo de Young promedio de 4.33GPa y ha resistido un promedio de 84.88MPa de tensión máxima. A pesar de que las propiedades de las muestras fabricadas distan de las de los compuestos basados en tejido de lino analizados en otros proyectos (las cuales han llegado a resistir tensiones máximas del orden de 100MPa [18, 19]) estos resultados indican que el proceso de fabricación de compuestos con refuerzo unidireccional de lino debe efectuarse en un rango de presiones inferior al de los compuestos con refuerzo de tejido de lino.

4.1.3. PARÁMETRO DE COMPOSICIÓN

Para analizar el parámetro de composición se han caracterizado un conjunto de muestras fabricadas bajo los mismos parámetros de temperatura y presión. El parámetro de temperatura se selecciona en base al valor óptimo descrito anteriormente, al igual que el de presión, calculado tras la caracterización de las muestras 1 y 2.

La composición de las muestras depende de la masa de las láminas de PLA y lino, así como del número de láminas de matriz y de refuerzo. La masa de las láminas de lino de dimensiones 18x26cm es 22.84g. La masa de las láminas de PLA se evalúa en un rango entre los 12g y los 18g. El número de láminas de matriz y de refuerzo es constante en todas las muestras excepto en la número 6 donde se reduce en uno la cantidad de láminas de matriz respecto al resto de muestras.

Dado que el número de láminas tanto de matriz como de refuerzo es constante excepto en la muestra 6 y que la masa de las láminas de lino es en todas las muestras de valor 22.84g, se puede deducir que la única variable de la que depende la composición de las muestras estudiadas en este apartado es la masa de las láminas de PLA. En lo referente al rango de valores estudiados para dicha variable, las muestras constituidas por laminas de PLA de masa inferior a 12g presentan problemas de cohesión entre las fibras y la matriz, dado que el PLA no se difunde correctamente en el material al ser insuficiente, mientras que las muestras constituidas por láminas de PLA de masa superior a 18g generan una elevada cantidad de desechos de PLA en el proceso. Las muestras estudiadas, junto con las gráficas obtenidas tras procesar los datos, se detallan a continuación.

Muestra 3.**Material de refuerzo:** Lino con hilado industrial.**Temperatura:** 185°C**Presión:** 4MPa**Número de capas:** Dos láminas de refuerzo.**Tipo de matriz:** Láminas de PLA intercaladas.**Porcentaje teórico de masa de refuerzo:** Contenido teórico de 48.76% de lino.**4MPa (PLA 12g/Lino unidireccional/PLA 12g) x2**

La muestra se constituye de dos componentes cada uno de los cuales está formado por una lámina de lino unidireccional y dos láminas de PLA. Cada lámina de lino unidireccional tiene una masa de valor 22.84g y cada lámina de PLA tiene una masa de valor 12g.

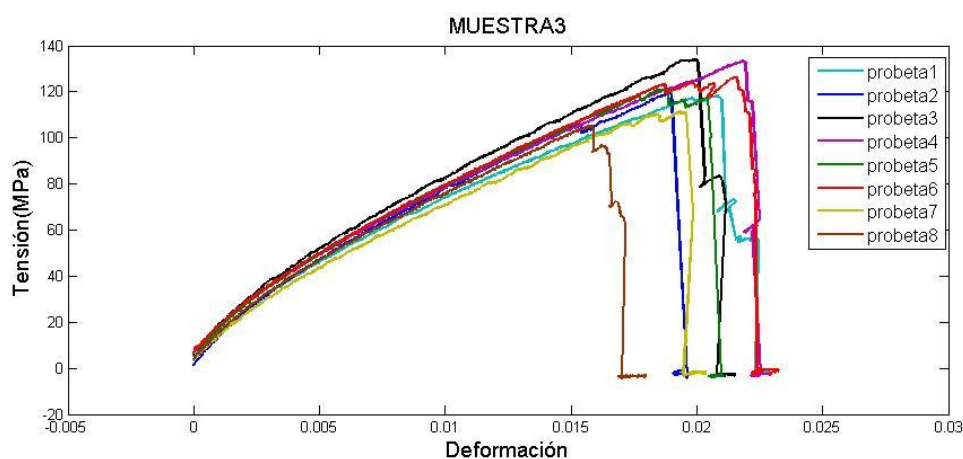


Figura 10. Diagramas tensión-deformación de las probetas de la muestra 3.

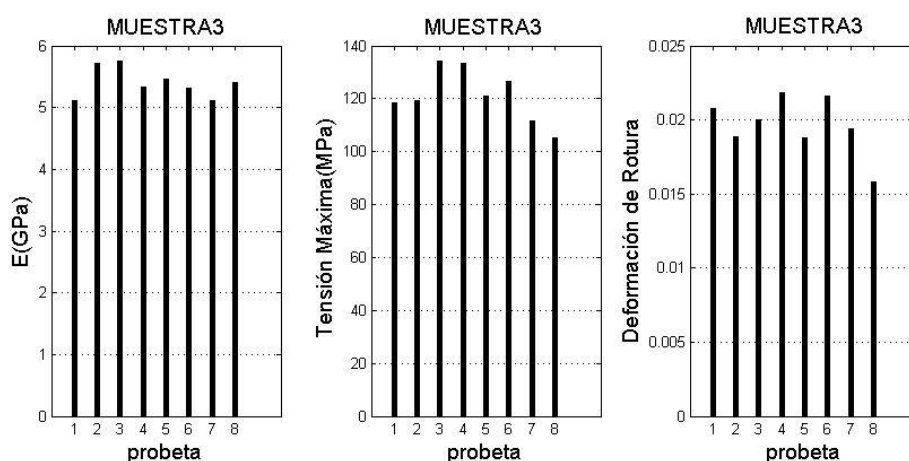


Figura 11. Representación gráfica de módulo de Young, tensión máxima y deformación de rotura de las probetas de la muestra 3.

Tabla 14. Datos estadísticos de las propiedades mecánicas de las probetas de la muestra 3.

Datos estadísticos	Módulo de Young(GPa)	Tensión Máxima(MPa)	Deformación de Rotura
Valor Máximo	5.75	134.10	0.022
Media	5.40	121.20	0.020
Desviación Estándar	0.24	9.97	0.0019
Coefficiente de Variación(adimensional)	0.044	0.082	0.095

Muestra 4.**Material de refuerzo:** Lino con hilado industrial.**Temperatura:** 185°C**Presión:** 4MPa**Número de capas:** Dos láminas de refuerzo.**Tipo de matriz:** Láminas de PLA intercaladas.**Porcentaje teórico de masa de refuerzo:** Contenido teórico de 43.22% de lino.**4MPa (PLA 15g/Lino unidireccional/PLA 15g) x2**

La muestra se constituye de dos componentes cada uno de los cuales está formado por una lámina de lino unidireccional y dos láminas de PLA. Cada lámina de lino unidireccional tiene una masa de valor 22.84g y cada lámina de PLA tiene una masa de valor 15g.

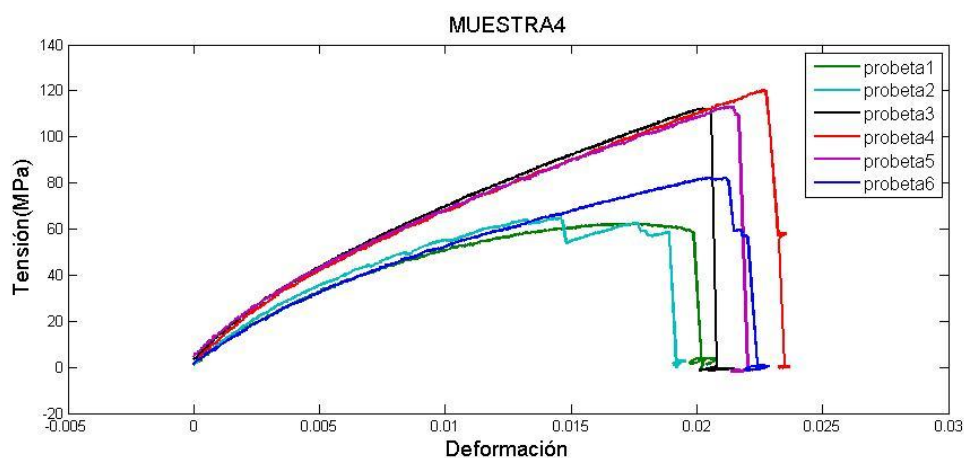


Figura 12. Diagramas tensión-deformación de las probetas de la muestra 4.

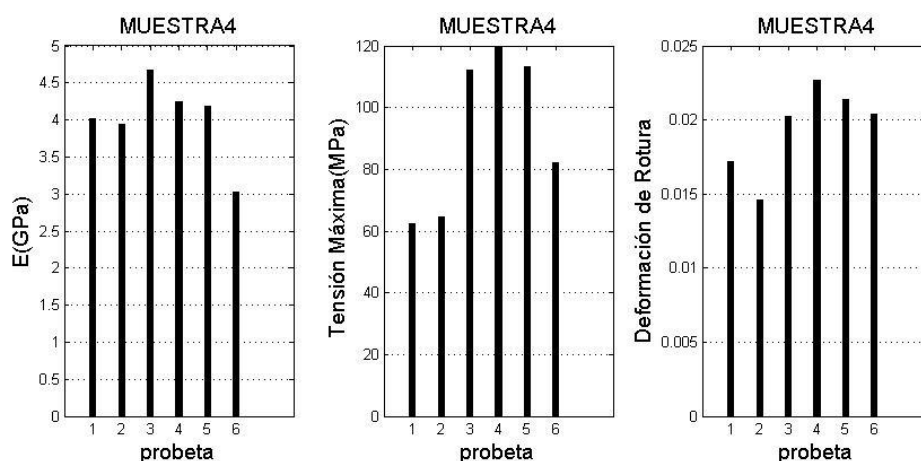


Figura 13. Representación gráfica de módulo de Young, tensión máxima y deformación de rotura de las probetas de la muestra 4.

Tabla 15. Datos estadísticos de las propiedades mecánicas de las probetas de la muestra 4.

Datos estadísticos	Módulo de Young(GPa)	Tensión Máxima(MPa)	Deformación de Rotura
Valor Máximo	4.67	120	0.023
Media	4.01	92.46	0.019
Desviación Estándar	0.55	25.91	0.0029
Coefficiente de Variación(adimensional)	0.14	0.28	0.15

Muestra 5.

Material de refuerzo: Lino con hilado industrial.

Temperatura: 185°C

Presión: 4MPa

Número de capas: Dos láminas de refuerzo.

Tipo de matriz: Láminas de PLA intercaladas.

Porcentaje teórico de masa de refuerzo: Contenido teórico de 38.82% de lino.

4MPa (PLA 18g/Lino unidireccional/PLA 18g) x2

La muestra se constituye de dos componentes cada uno de los cuales está formado por una lámina de lino unidireccional y dos láminas de PLA. Cada lámina de lino unidireccional tiene una masa de valor 22.84g y cada lámina de PLA tiene una masa de valor 18g.

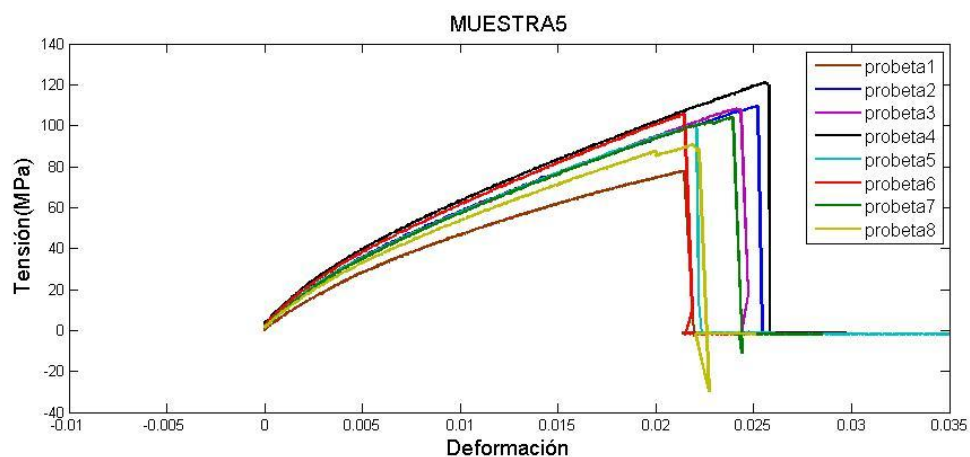


Figura 14. Diagramas tensión-deformación de las probetas de la muestra 5.

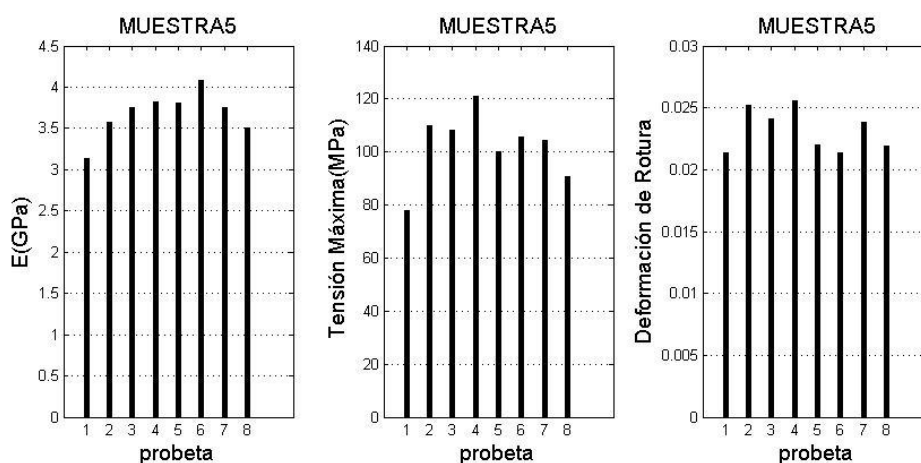


Figura 15. Representación gráfica de módulo de Young, tensión máxima y deformación de rotura de las probetas de la muestra 5.

Tabla 16. Datos estadísticos de las propiedades mecánicas de las probetas de la muestra 5.

Datos estadísticos	Módulo de Young(GPa)	Tensión Máxima(MPa)	Deformación de Rotura
Valor Máximo	4.08	121	0.026
Media	3.68	102.20	0.023
Desviación Estándar	0.28	13.06	0.0019
Coefficiente de Variación(adimensional)	0.076	0.13	0.082

Muestra 6.**Material de refuerzo:** Lino con hilado industrial.**Temperatura:** 185°C**Presión:** 4MPa**Número de capas:** Dos láminas de refuerzo.**Tipo de matriz:** Láminas de PLA intercaladas.**Porcentaje teórico de masa de refuerzo:** Contenido teórico de 55.92% de lino.**4MPa (PLA 12g/Lino unidireccional/PLA 12g/Lino unidireccional/PLA 12g)**

La muestra se constituye de un componente, formado por dos láminas de lino unidireccional y tres láminas de PLA. Cada lámina de lino unidireccional tiene una masa de valor 22.84g y cada lámina de PLA tiene una masa de valor 12g.

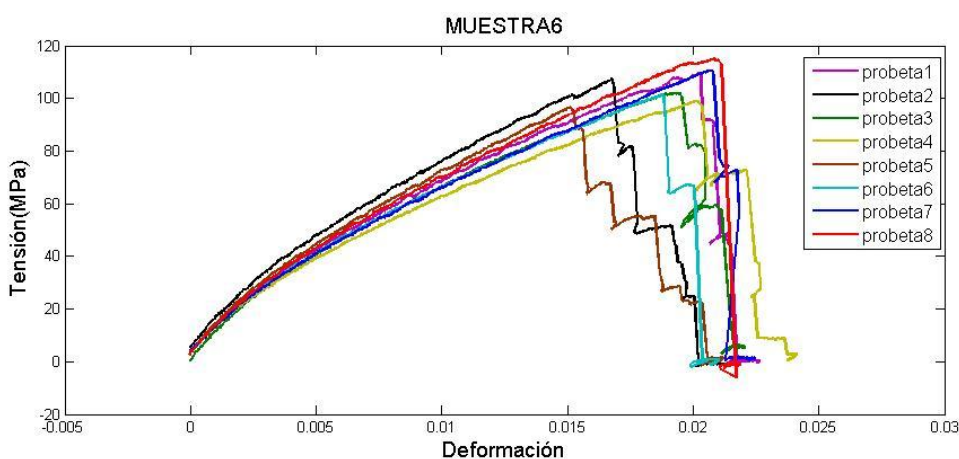


Figura 16. Diagramas tensión-deformación de las probetas de la muestra 6.

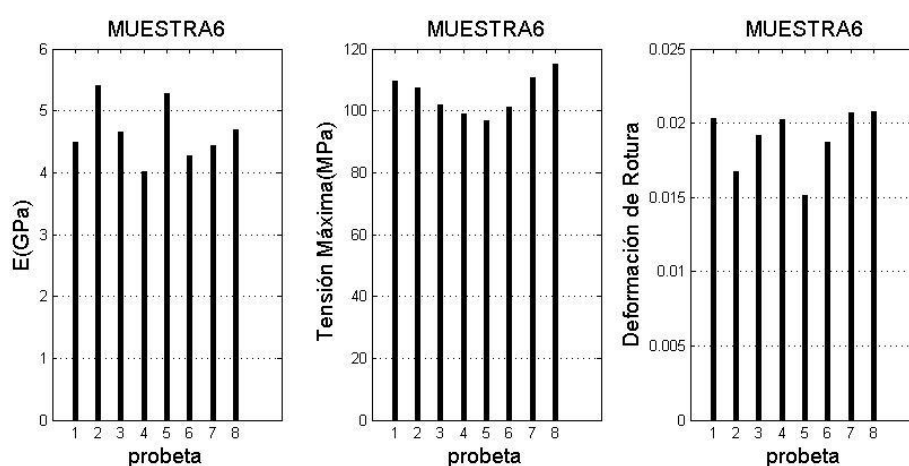


Figura 17. Representación gráfica de módulo de Young, tensión máxima y deformación de rotura de las probetas de la muestra 6.

Tabla 17. Datos estadísticos de las propiedades mecánicas de las probetas de la muestra 6.

Datos estadísticos	Módulo de Young(GPa)	Tensión Máxima(MPa)	Deformación de Rotura
Valor Máximo	5.41	115	0.021
Media	4.66	105.20	0.019
Desviación Estándar	0.48	6.40	0.0021
Coefficiente de Variación(adimensional)	0.10	0.061	0.11

A partir de los resultados obtenidos se pueden sacar una serie de conclusiones en base a la composición teórica de las muestras. La deformación a la rotura presenta un rango de valores reducido para las muestras estudiadas al igual que ocurre en el estudio de la presión. Se pueden apreciar diferencias más significativas en el análisis del módulo de Young y de la tensión máxima.

La rigidez del compuesto crece (tanto en el valor máximo como en valor promedio) junto con el contenido de lino teórico cuando este parámetro presenta valores comprendidos entre el 39% y el 49%, sin embargo este crecimiento se detiene cuando el contenido toma valores comprendidos entre el 49% y el 56%. Destaca en este sentido la muestra número 3 que presenta un contenido de lino teórico de valor 48.76% y que ha alcanzado un valor promedio y un valor máximo de módulo de Young de 5.40GPa y 5.75GPa respectivamente. Además esta muestra presenta un coeficiente de variación del módulo de Young de valor 4.4%, se trata por tanto de la muestra de mayor rigidez y con mayor homogeneidad en este sentido.

En términos de tensión máxima, se puede observar como los valores máximos de esta variable se mantienen constantes cuando el contenido de lino teórico de las muestras toma valores comprendidos entre 39% y 43%. Mientras que para el rango comprendido entre los valores 43% y 49% (contenido de lino teórico), tanto el valor máximo como el valor promedio de la tensión máxima de las muestras crecen con el contenido de lino teórico. Al igual que en el caso de la rigidez, para valores comprendidos entre el 49% y el 56% de contenido de lino teórico, la tensión máxima de la muestra decrece tanto en su valor máximo como en su valor promedio. La muestra número 3 destaca por los valores máximo y promedio de tensión máxima, que son respectivamente 134.10MPa y 121.10MPa. Estos valores son equiparables a los obtenidos en materiales compuestos con refuerzo de tejido de lino que han sido caracterizados en otros proyectos [18, 19]. El bajo coeficiente de variación de la muestra 3 (8.20%) en comparación al resto de compuestos producidos refleja asimismo un alto grado de homogeneidad en términos de tensión máxima resistida, este hecho también ha sido recalado en el análisis de rigidez.

Los valores de contenido de lino de cada muestra introducidos hasta este punto son teóricos, es decir, representan la composición de la muestra antes de ejecutar los ciclos de compresión.

Tal y como se ha comentado en el apartado de presión, la maquinaria disponible no está estrictamente diseñada para la fabricación de los materiales compuestos que se quieren

estudiar. Por este motivo la aplicación de presión en las muestras durante la compresión no es uniforme. Como consecuencia, tiene lugar la distribución no homogénea de PLA en el compuesto. Esta distribución de PLA hace que las muestras presenten una composición variable. A continuación se incluyen unas gráficas que reflejan la heterogeneidad de las muestras.

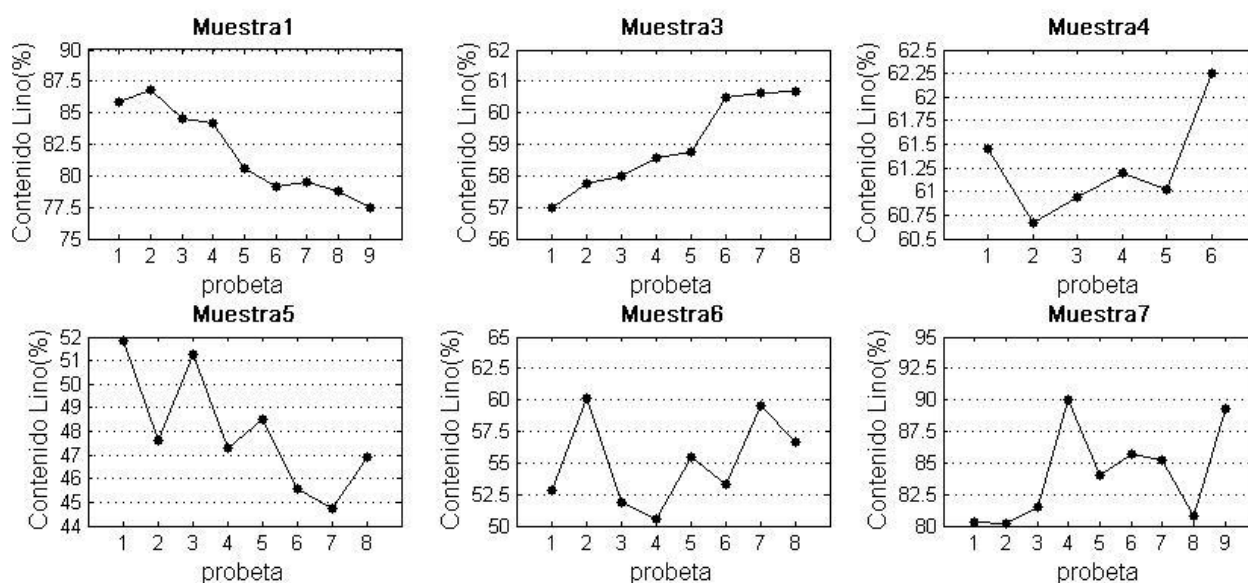


Figura 18. Diagramas de contenido de lino (%) de las probetas de las muestras 1, 3, 4, 5, 6, 7.

Además, la aplicación de presión no uniforme durante el ensayo puede ser uno de los motivos por los que durante el proceso de fabricación se producen pérdidas irremediables de material bioplástico. Otras variables que pueden influir en estas pérdidas son:

1. Las características de las fibras de refuerzo escogidas.
2. Densidad de fibras de las láminas.
3. Exceso de presión en el proceso.
4. Tiempo de ciclo de compresión.

La siguiente tabla ejemplifica las pérdidas de PLA producidas durante el proceso de fabricación. En ella se incluyen muestras fabricadas bajo distintos parámetros. El contenido real promedio de PLA se calcula a partir del contenido real de PLA de todas las probetas de cada muestra.

Tabla 18. Contenido teórico de PLA (%) y contenido real promedio de PLA (%) de las muestras 1, 3, 4, 5, 7.

Muestra	Contenido Teórico PLA(%)	Contenido Real Promedio PLA(%)
1	56.78	18.13
3	51.24	41.02
4	56.78	38.75
5	61.18	52.02
7	51.24	15.88

A consecuencia de las pérdidas mencionadas, las muestras estudiadas en este apartado de composición reducen su contenido de PLA respecto del contenido teórico en un valor promedio del 12.47%. Con los medios disponibles no ha sido posible producir materiales con una composición real igual a la teórica. Si en futuras investigaciones no es posible dar con las causas de las pérdidas de PLA durante el proceso de compresión, sería interesante comprobar si al conocer el valor promedio de reducción de PLA de las muestras (respecto de la composición teórica) se podrían ajustar los valores de composición teóricos para obtener muestras con una composición real próxima a la deseada.

Además de las pérdidas y la distribución no uniforme de PLA, en las gráficas de la figura 18 se aprecia que cada muestra presenta una distribución de material bioplástico propia. Es importante destacar que las muestras fabricadas fueron introducidas en la máquina de ensayos en posiciones distintas respecto a los platos de compresión en cada proceso. Esto, sumado a los defectos del utillaje antes mencionados (platos calefactores descompensados) da lugar a la aplicación de presión sobre los materiales no uniforme (mencionado anteriormente) y variable en cada proceso de fabricación. Sería muy útil por tanto diseñar un sistema de colocación de las láminas de fibra y PLA en la máquina de ensayos más preciso que garantizara que las muestras estén centradas. Además, una posible solución a la distribución no homogénea de PLA sería la instalación de un sistema de guías que garantizara el paralelismo de las placas calefactoras. De esta forma la fuerza ejercida por la máquina de ensayos se distribuiría uniformemente. Con estas mejoras es posible que se obtuvieran resultados más similares tras la fabricación en lo que respecta a la composición de las muestras.

Sería interesante también efectuar un análisis más profundo de las variables que pueden generar pérdidas de PLA durante el proceso de fabricación, además de diseñar el utillaje descrito anteriormente para comprobar si mejora la distribución de PLA en las muestras. Sin embargo, el objetivo de este trabajo no es el de optimizar el proceso y los medios disponibles para la fabricación de los materiales compuestos con refuerzo unidireccional de lino. Sino el de conseguir producir con el proceso diseñado inicialmente (descrito en anteriores apartados) y los medios disponibles, compuestos con propiedades equiparables a las de los materiales fabricados en anteriores proyectos [18, 19]. De esta forma se pretende motivar la investigación en este campo, lo que incluye la optimización del proceso (reducir pérdidas, distribución uniforme de PLA) para mejorar la producción.

Tanto las pérdidas de PLA como la distribución no uniforme de PLA en el compuesto hacen que la composición teórica de las muestras difiera de la composición real.

A continuación se muestran unas gráficas (figuras 19 y 20) que reflejan la correlación entre la composición real de los compuestos producidos y sus propiedades mecánicas. Estas gráficas se han obtenido tras la caracterización de todas las probetas extraídas de las muestras producidas bajo parámetros de fabricación constantes a excepción de la composición. Las propiedades mecánicas del compuesto dependen tanto de su composición como de la orientación de las fibras. Las gráficas incluyen las probetas extraídas de los extremos de los materiales producidos. En la mayor parte de las muestras estas probetas han presentado una orientación de las fibras inadecuada, lo que resulta en unas propiedades muy bajas. El hecho

de que estén incluidas hace que las gráficas muestren datos con una destacada dispersión, lo que impide que se pueda establecer una ley que prediga las propiedades del material en función del contenido de lino.

Las gráficas muestran que para un contenido de lino comprendido entre los valores 44.5% y 51.9% el módulo de Young del compuesto varía entre 3.2GPa y 4.2GPa. Para un contenido de lino comprendido entre 51.9% y 59% puede apreciarse cierta tendencia creciente en el módulo de Young del compuesto a medida que aumenta el contenido de lino, alcanzando un valor máximo de 5.75GPa para una composición de 58% (contenido de lino). Por último, para un contenido de lino comprendido entre un 60% y 62.5% puede apreciarse cierta tendencia decreciente en el módulo de Young a medida que aumente el contenido de lino en dicho intervalo.

Si se observan las gráficas de tensión máxima frente al contenido de lino del compuesto, es más difícil dar una tendencia a los datos recogidos. Puede observarse que para los valores de contenido de lino comprendidos entre 44.5% y 56% la tensión máxima del compuesto varía entre 79GPa y 120GPa. Si el contenido de lino se evalúa entre los valores 56% y 62.4% y se desprecian tres datos cuyos valores de tensión máxima (60MPa, 65MPa y 82.5MPa) se alejan de la nube de puntos, puede apreciarse que la tensión máxima varía entre los valores 105MPa y 134MPa, alcanzando valores máximos para un contenido de lino de valor 58%.

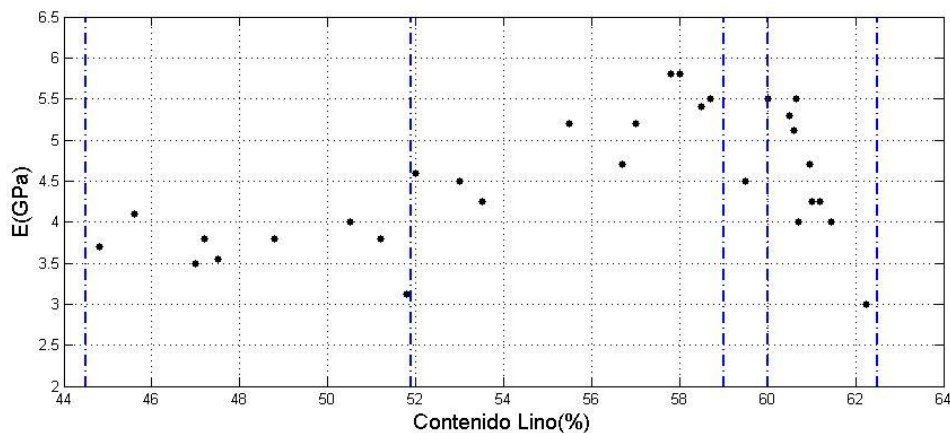


Figura 19. Diagrama de contenido de lino (%) frente a módulo de Young de las probetas extraídas de las muestras producidas bajo los mismos parámetros excepto composición.

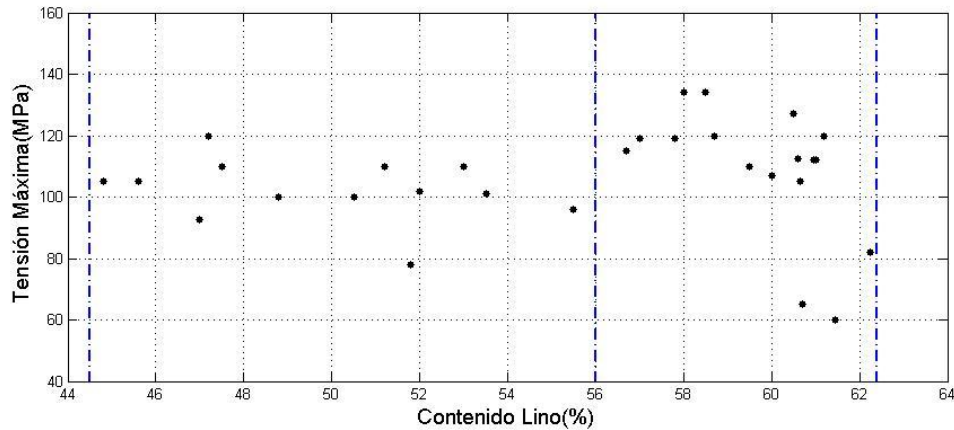


Figura 20. Diagrama de contenido de lino (%) frente a tensión máxima de las probetas extraídas de las muestras producidas bajo los mismos parámetros excepto composición.

Atendiendo a estas gráficas se puede apreciar que los valores máximos en términos de rigidez y tensión máxima se alcanzan para una composición próxima al 58% de contenido de lino. Es importante recordar que las probetas que presentan una composición próxima a este valor pueden proceder de muestras distintas, ya que la aplicación de presión no uniforme durante el proceso de compresión provoca la distribución no homogénea de PLA en las muestras.

Los fallos del proceso de fabricación han impedido producir muestras con una composición teórica igual a la real, por tanto no se pueden definir los parámetros del proceso que permiten obtener compuestos con un contenido real de PLA de valor 58%. Sin embargo, para el proceso de fabricación aplicado se ha alcanzado un valor de composición teórico que permite obtener muestras con propiedades muy elevadas. La muestra 3 con un contenido de lino teórico de valor 48.76% destaca por los valores máximo y promedio de tensión máxima, que son respectivamente 134.10MPa y 121.10MPa. Esto muestra la posibilidad de producir compuestos con refuerzo unidireccional de lino de altas propiedades mediante procesos basados en compresión con placas calefactoras.

EFFECTO DE LA ORIENTACIÓN DE LAS FIBRAS EN LAS PROPIEDADES DEL COMPUESTO

En el estudio de las gráficas de las figuras 19 y 20 se ha comentado que las probetas extraídas de los extremos de las muestras presentan en la mayor parte de los casos una orientación de los hilos inadecuada. Las bajas propiedades de las probetas que se constituyen con estos hilos ha sido una de las causas de la destacada dispersión de dichas gráficas. Los motivos por los que los hilos de los extremos toman esta orientación tras el proceso de compresión pueden ser múltiples, pero no son analizadas en este trabajo. A continuación se analiza el efecto de la orientación de las fibras en las propiedades del compuesto.

Las propiedades del compuesto con refuerzo unidireccional de fibras dependen de su composición y de la orientación de las fibras. Al realizar los ensayos de tracción, el estado tensional evaluado sobre las fibras y la matriz depende del sistema uniaxial de cargas aplicado (ensayos de tracción uniaxial) y de la orientación de las fibras.

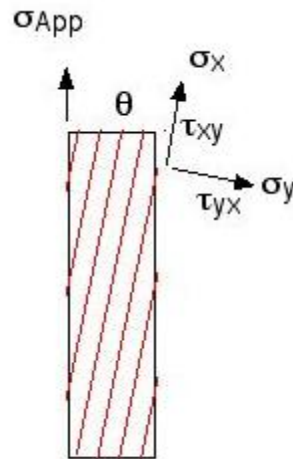


Figura 21. Estado tensional en probeta con refuerzo de fibras unidireccional sometida a sistema de cargas uniaxial [37].

En los ensayos realizados, dependiendo de la orientación de las fibras se han dado dos modos de fallo.

1. Fallo por rotura de fibras a tracción:

Ocurre cuando la orientación de las fibras es paralela al sistema de cargas aplicado o cuando el ángulo entre la dirección de las fibras y la carga aplicada θ , es bajo (las probetas extraídas de las zonas centrales de las muestras presentan esta orientación de hilos). A medida que aumenta el sistema de cargas aplicado en el ensayo aumenta el estado tensional evaluado sobre las fibras y la matriz. En estos casos el estado tensional alcanza antes la resistencia de las fibras que la resistencia de la matriz. Esto se debe a que el ángulo θ es lo suficientemente bajo como para que la tensión normal sobre las fibras sea mucho mayor que la tensión de cortadura incidente en la matriz.



Figura 22. Rotura teórica de probeta con refuerzo de fibras unidireccional sometida a sistema de cargas uniaxial paralelo a la dirección de las fibras [37].

La siguiente imagen refleja este modo de fallo en las probetas estudiadas. La imagen corresponde a una probeta extraída de la zona central de una muestra genérica de compuesto con refuerzo unidireccional de lino hilado industrialmente.

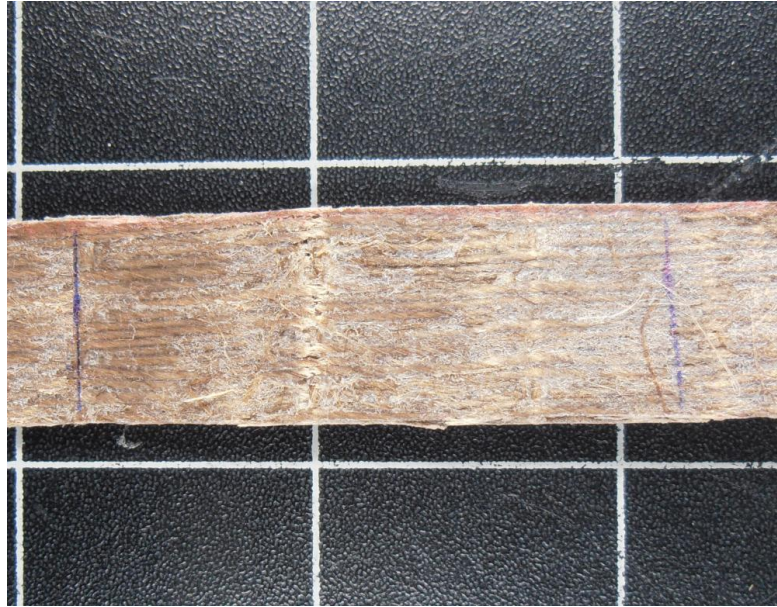


Figura 23. Modo de fallo de probeta con refuerzo unidireccional extraída de zona central de una muestra genérica.

2. Fallo por cortadura de la matriz

A medida que el ángulo entre la dirección de las fibras y el sistema de cargas aplicado θ , aumenta, la proporción entre la tensión normal sobre las fibras y la tensión de cortadura incidente en la matriz disminuye. Si las fibras que constituyen el refuerzo presentan un ángulo θ lo suficientemente alto (las probetas extraídas de los extremos de las muestras presentan un θ elevado), el estado tensional sobre las fibras y la matriz (que aumenta a medida que crece el sistema uniaxial de cargas aplicado en el ensayo) alcanzará antes la resistencia de la matriz que la resistencia de las fibras. En estos casos la rotura teórica es:

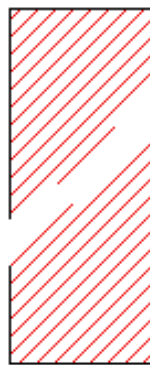


Figura 24. Rotura teórica de probeta con refuerzo de fibras unidireccional sometida a sistema de cargas uniaxial no paralelo a la dirección de las fibras [37].

La siguiente imagen refleja este modo de fallo en las probetas estudiadas. La imagen corresponde a una probeta extraída de los extremos de una muestra genérica de compuesto con refuerzo unidireccional de lino hilado industrialmente.

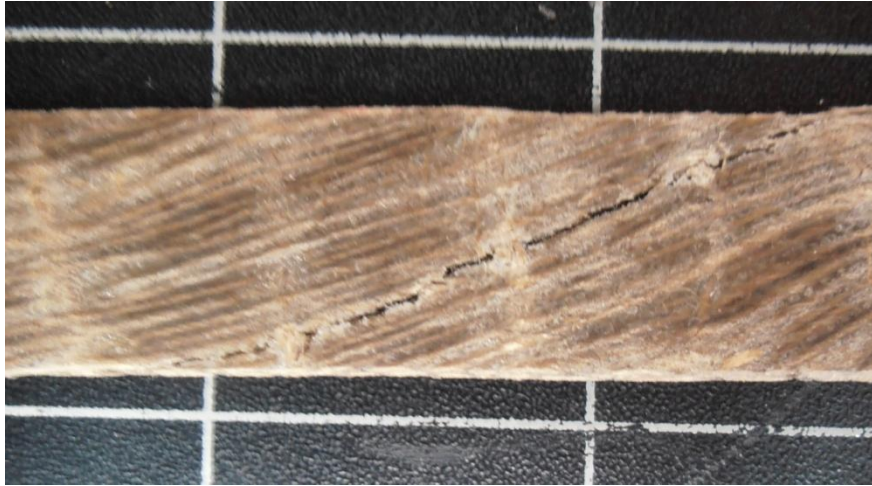


Figura 25. Modo de fallo de probeta con refuerzo unidireccional extraída de los extremos de una muestra genérica.

La resistencia de la matriz es inferior a la resistencia de las fibras, por este motivo las probetas extraídas de los extremos de las muestras presentan unas propiedades muy inferiores a las extraídas de las zonas centrales de las muestras.

Como se ha comentado anteriormente, las propiedades del compuesto basado en refuerzo unidireccional de fibras dependen de su composición y de la orientación de las fibras. Las siguientes gráficas reflejan los efectos de la presencia de hilos con una orientación inadecuada sobre las propiedades del compuesto. Incluir estas gráficas permite estudiar la dispersión de los diagramas de las figuras 19 y 20. Para ver el efecto de la orientación de los hilos deben compararse las propiedades de las probetas que tengan una composición similar (recordar que debido a la aplicación de presión no uniforme el PLA se distribuye de forma no homogénea) pero que estén constituidas por hilos con distinta orientación, es decir, comparando probetas extraídas de los extremos y del centro con una composición similar.

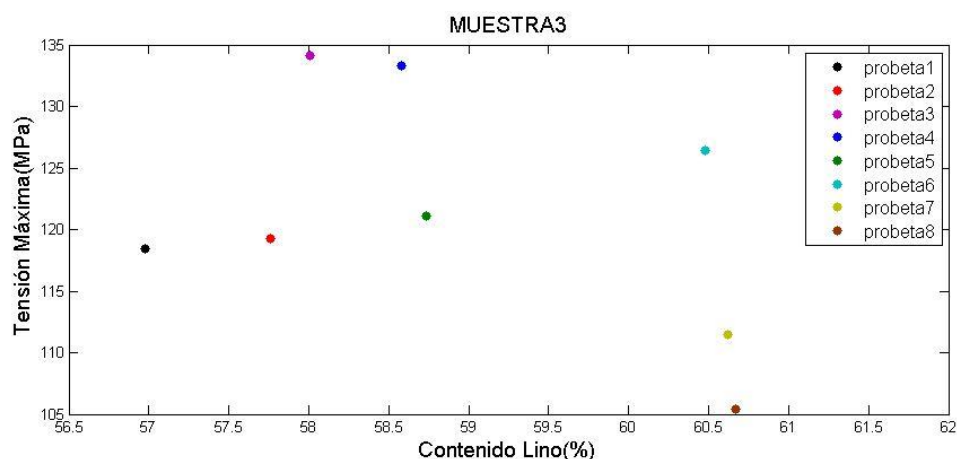


Figura 26. Diagrama de contenido de lino (%) frente a tensión máxima de las probetas de la muestra 3.

En esta gráfica puede apreciarse el efecto de la orientación de los hilos comparando las probetas 8 y 6 con un contenido de lino de valor 60.67 % y 60.48% respectivamente. Mientras que la probeta 6 pertenece a una zona de la muestra donde los hilos se encuentran

correctamente orientados, la probeta 8, extraída del extremo de la muestra, presenta una orientación de fibras inadecuada.

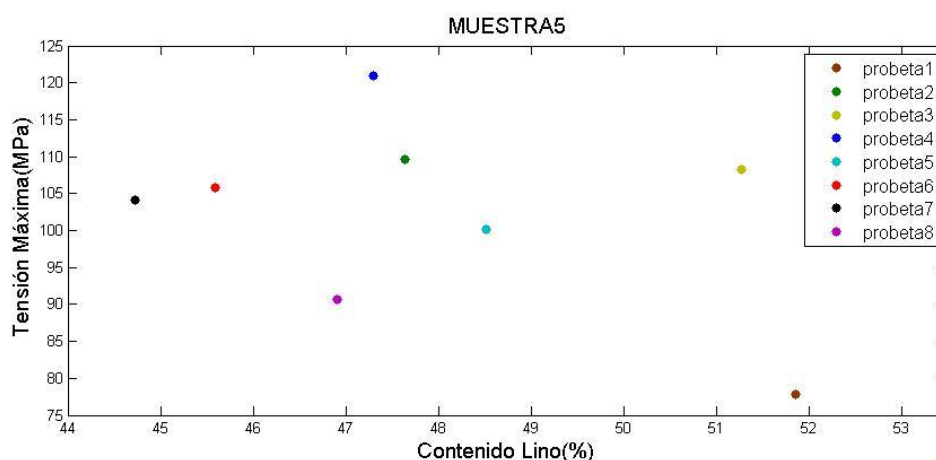


Figura 27. Diagrama de contenido de lino (%) frente a tensión máxima de las probetas de la muestra 5.

En esta gráfica puede apreciarse el efecto de la orientación de los hilos comparando las probetas 1 y 3 con un contenido de lino de valor 51.86% y 51.27% respectivamente. Mientras que la probeta 3 pertenece a una zona de la muestra donde los hilos se encuentran correctamente orientados, la probeta 1, extraída del extremo de la muestra, presenta una orientación de fibras inadecuada. También son una muestra del efecto de la orientación de las fibras las probetas 8 y 4 con un contenido de lino de valor 46.90% y 47.30% respectivamente.

4.1.4. PARÁMETRO NÚMERO DE LÁMINAS DE LINO

Establecidos los parámetros óptimos de temperatura, presión y composición teórica para el proceso utilizado, se procede a evaluar el efecto que tiene el número de láminas de refuerzo en el compuesto. Los estudios previos a cerca de compuestos biodegradables se basan en el uso de tejido de lino tal y como se ha comentado, además estos estudios incluyen ensayos de impacto a diferente energía para caracterizar el material [18]. El hecho de que el refuerzo de lino sea en formato tejido facilita la cohesión con la matriz, esto permite apilar varias láminas de refuerzo lo que resulta determinante para las propiedades del material frente a los ensayos de impacto. En el caso de refuerzo unidireccional, la cohesión entre refuerzo y matriz puede verse afectada al incrementar las láminas de lino. Además, la influencia del número de láminas de refuerzo en las propiedades mecánicas del material caracterizado con ensayos de tracción no es tan relevante como en el caso de los materiales sometidos a ensayos de impacto. Es decir, los ensayos de tracción pueden no revelar las ventajas o inconvenientes que supone la variación del número de láminas de refuerzo de los compuestos estudiados. Las muestras estudiadas, junto con las gráficas correspondientes, se detallan a continuación.

Muestra 3.

La muestra ha sido detallada en el apartado de composición. Tiene dos láminas de refuerzo y se trata de la muestra que mayores propiedades mecánicas ha reportado en los ensayos de tracción de compuestos con dos láminas de lino unidireccional. Se toman por tanto como referencia los parámetros de temperatura, presión y composición teórica para la fabricación de la muestra 7.

Muestra 7.

Material de refuerzo: Lino con hilado industrial.

Temperatura: 185°C

Presión: 4MPa

Número de capas: Cuatro láminas de refuerzo.

Tipo de matriz: Láminas de PLA intercaladas.

Porcentaje teórico de masa de refuerzo: Contenido teórico de 48.76% de lino. Tal y como se ha apuntado la composición teórica es igual en ambas muestras.

4MPa (PLA 12g/Lino unidireccional/PLA 12g) x4

La muestra se constituye de cuatro componentes cada uno de los cuales está formado por una lámina de lino unidireccional y dos láminas de PLA. Cada lámina de lino unidireccional tiene una masa de valor 22.84g y cada lámina de PLA tiene una masa de valor 12g.

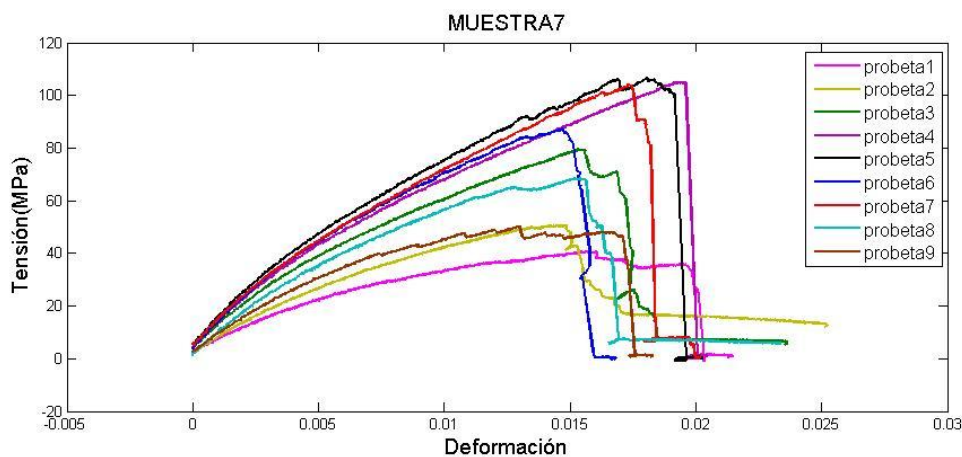


Figura 28. Diagramas tensión-deformación de las probetas de la muestra 7.

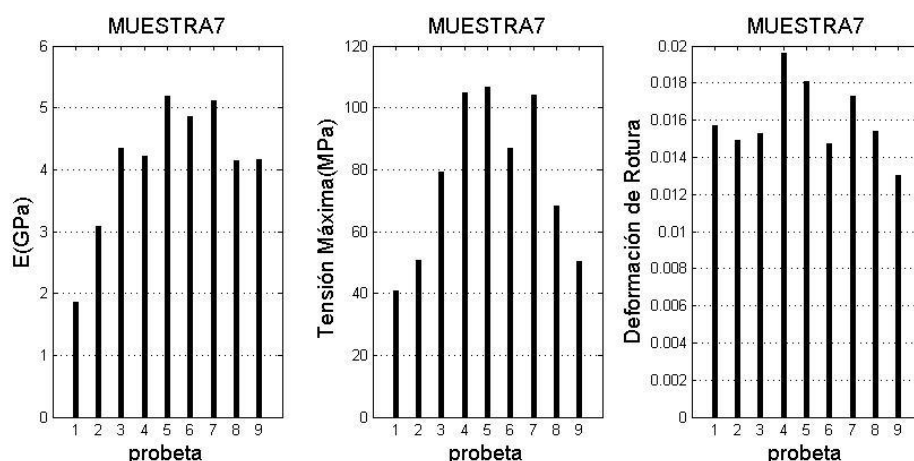


Figura 29. Representación gráfica de módulo de Young, tensión máxima y deformación de rotura de las probetas de la muestra 7.

Tabla 19. Datos estadísticos de las propiedades mecánicas de las probetas de la muestra 7.

Datos estadísticos	Módulo de Young(GPa)	Tensión Máxima(MPa)	Deformación de Rotura
Valor Máximo	5.18	106.70	0.019
Media	4.11	76.9	0.016
Desviación Estándar	1.06	25.75	0.0019
Coefficiente de Variación(adimensional)	0.26	0.33	0.12

Los datos de rigidez y tensión máxima estudiados como valores máximos de las muestras ofrecen cifras semejantes en los dos casos. Se pueden apreciar mayor diferencia cuando estos datos se evalúan como valores promedios de las muestras. En este caso frente al módulo de Young promedio de la muestra 7, de valor 4.11GPa, destaca la muestra 3, con un valor promedio de 5.40GPa. Asimismo en el caso de tensión máxima también destaca la muestra 3 con un valor promedio de 121.20MPa frente al valor promedio de la muestra 7 que resulta en 76.90MPa. Al igual que en los análisis anteriores la deformación de rotura no ofrece diferencias significativas entre ambas muestras.

Otro factor a favor de la muestra con menor número de láminas de refuerzo es el reducido valor de coeficiente de variación que presenta tanto para la rigidez como para la tensión máxima. La muestra 7 es más heterogénea en este sentido, pues las propiedades de la muestra dependen en mayor medida del área analizada. Además, el estudio de la composición real promedio (calculada tras el proceso de compresión) de las muestras con cuatro láminas de refuerzo revela unas pérdidas de PLA muy superiores a las asociadas a la fabricación de compuestos con dos láminas de refuerzo. La siguiente tabla refleja las pérdidas de PLA durante la fabricación de las muestras 1 y 7, ambas con cuatro láminas de refuerzo.

Tabla 20. Contenido teórico de PLA (%) y contenido real promedio de PLA (%) de las muestras 1, 7.

Muestra	Contenido Teórico PLA(%)	Contenido Real Promedio PLA(%)
1	56.78	19
7	51.24	15.90

Mientras que durante la fabricación de compuestos con dos láminas de refuerzo se incurre en una reducción del contenido de PLA respecto del contenido teórico en un valor promedio del 12.47%, la fabricación de compuestos con cuatro láminas de refuerzo ha supuesto una reducción del contenido teórico de PLA en un valor promedio de 36.56%. Entre los factores a los que puede atribuirse las pérdidas de PLA durante el proceso de fabricación se ha hecho mención a la densidad de fibras de las láminas. Si bien en el caso de las muestras 1 y 7 la densidad de fibras de las láminas de lino es constante respecto al resto de muestras fabricadas ($4.88 \text{ e-4 (g/mm}^2\text{)}$), el hecho de apilar mayor cantidad de láminas implica un aumento de la densidad de fibras en la muestra. Las muestras 1 y 7 reflejan que un incremento de la densidad de fibras supone mayores pérdidas de PLA que en los casos en los que el compuesto se constituye por dos láminas de refuerzo. Sin embargo estos resultados no son concluyentes, pues las pérdidas de material bioplástico pueden deberse a muchos otros parámetros, esto refleja la necesidad de realizar un estudio más profundo sobre los factores que influyen en las pérdidas de PLA asociadas al proceso.

Limitados por el proceso y atendiendo a la elevada cantidad de residuos generados junto con las reducidas propiedades de las muestras con cuatro láminas de refuerzo, se decide detener la producción de los compuestos con alto número de láminas de lino.

A pesar de los problemas derivados de la aplicación de un proceso de fabricación no optimizado (heterogeneidad de las muestras en su composición, baja capacidad para producir muestras con distribución de PLA similar, pérdidas de PLA) ha sido posible producir un material compuesto laminar con refuerzo unidireccional de lino con altas propiedades mecánicas en términos de rigidez y tensión máxima. Esto se ha conseguido tras el análisis de los principales parámetros que influyen en el proceso de fabricación (basado en la compresión con placas calefactoras) desarrollado en este proyecto con los medios disponibles. En base a los parámetros óptimos se fabricaron tanto la muestra del material con refuerzo unidireccional de lino hilado manualmente como una muestra de material con refuerzo de lino tejido. Se espera que los resultados ofrecidos en este proyecto consigan motivar investigaciones relacionadas con materiales compuestos con refuerzo unidireccional de fibras de lino.

4.2. REFUERZO DE LINO UNIDIRECCIONAL HILADO MANUALMENTE

Tal y como se ha expuesto en el apartado de fabricación, la producción de capas de refuerzo unidireccional mediante lino hilado manualmente ha sido motivada por varios puntos. En primer lugar se quiere comprobar si es posible elaborar este tipo de láminas con los medios disponibles. Además la caracterización de los compuestos constituidos por este refuerzo permitiría evaluar las diferencias que supone su uso respecto de los compuestos con refuerzo de lino hilado industrialmente (efecto sobre las propiedades del compuesto de un ángulo de

hilado diferente, comprobar si con este tipo de fibras se mejora el impregnado y se reducen las pérdidas de PLA).

El estudio de las muestras con refuerzo unidireccional de lino hilado industrialmente ha permitido definir los parámetros de fabricación óptimos (temperatura, presión, composición teórica y número de láminas de refuerzo) para el proceso aplicado en este proyecto, es decir los parámetros con los que se obtienen los compuestos de mayores propiedades dados los medios disponibles. Dado que la fabricación de los materiales basados en refuerzo de lino hilado manualmente está limitada por el tiempo de producción, se ha rechazado realizar un estudio similar al efectuado con los compuestos con refuerzo de lino hilado industrialmente. En cambio, para la producción de estos compuestos se ha decidido aplicar los parámetros óptimos anteriormente descritos. Tras la caracterización de la muestra fabricada se realiza una comparación entre sus propiedades y las correspondientes a la muestra 3, que ha constituido el compuesto con refuerzo de lino hilado industrialmente con mayores propiedades.

Es importante destacar que la falta de medios para la fabricación de hilo con una morfología uniforme ha sido la causa de la heterogeneidad del hilo producido. La heterogeneidad del hilo ha impedido calcular la densidad superficial de las láminas de refuerzo unidireccional basadas en este material. A consecuencia de esto y dados los elevados tiempos de fabricación, no se ha podido efectuar un análisis que reporte la correlación entre la composición y las propiedades mecánicas de los compuestos con refuerzo de lino hilado manualmente. Un estudio más completo debería incluir un análisis de la composición similar al realizado sobre las muestras con refuerzo de lino hilado industrialmente, este análisis permitiría calcular la composición teórica y real óptima para estos compuestos. Dado que no ha sido posible efectuar este análisis, se han aplicado directamente los parámetros óptimos relacionados con la composición de los compuestos con refuerzo de lino hilado industrialmente. La muestra estudiada, junto con las gráficas obtenidas tras procesar los datos de los ensayos, se detalla a continuación.

Muestra 8.

Material de refuerzo: Lino con hilado manual.

Temperatura: 185°C

Presión: 4MPa

Número de capas: Dos láminas de refuerzo.

Tipo de matriz: Láminas de PLA intercaladas.

Porcentaje teórico de masa de refuerzo: Como se ha explicado anteriormente, al no disponer del dato de la densidad superficial no ha sido posible calcular la masa de las láminas de lino.

4MPa (PLA 12g/Lino unidireccional/PLA 12g) x2

La muestra se constituye de dos componentes cada uno de los cuales está formado por una lámina de lino unidireccional y dos láminas de PLA. Parámetros que determinan la composición como la dimensión de las capas de lino que constituyen la muestra; la masa de las capas de bioplástico y el número de láminas de la muestra. Se

han definido en base a los parámetros óptimos de los compuestos con refuerzo de lino hilado industrialmente.

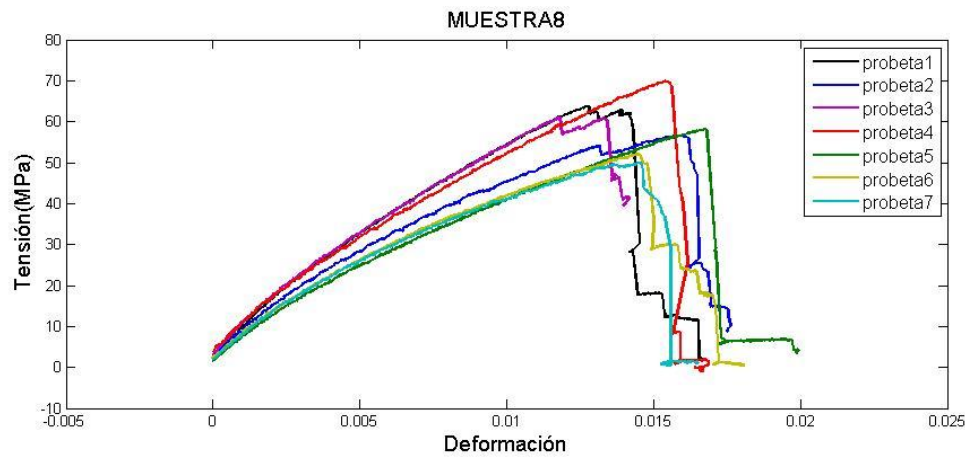


Figura 30. Diagramas tensión-deformación de las probetas de la muestra 8.

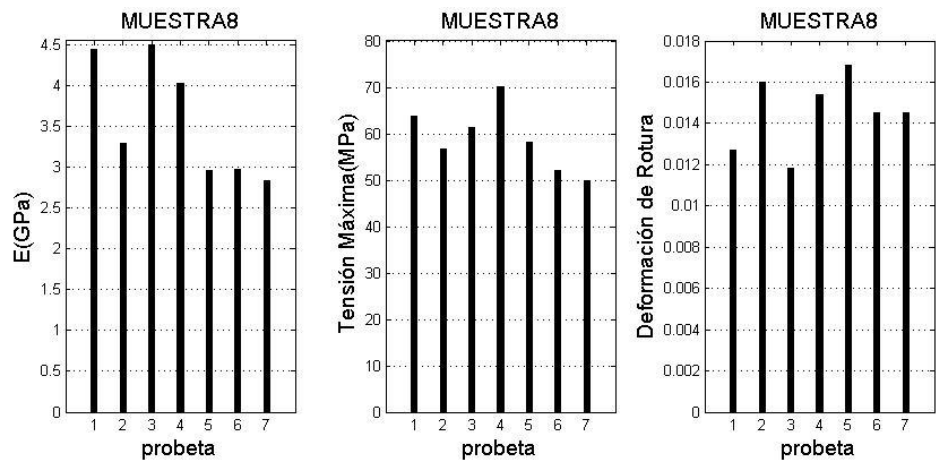


Figura 31. Representación gráfica de módulo de Young, tensión máxima y deformación de rotura de las probetas de la muestra 8.

Tabla 21. Datos estadísticos de las propiedades mecánicas de las probetas de la muestra 8.

Datos estadísticos	Módulo de Young(GPa)	Tensión Máxima(MPa)	Deformación de Rotura
Valor Máximo	4.49	70.09	0.017
Media	3.57	58.85	0.015
Desviación Estándar	0.73	6.92	0.0018
Coefficiente de Variación(adimensional)	0.21	0.12	0.12

Si se comparan los resultados con los obtenidos tras la caracterización de la muestra 3 se pueden apreciar diferencias notables en términos de rigidez y tensión máxima. Frente al valor máximo del módulo de Young alcanzado en la muestra 8 y al valor máximo de tensión máxima 4.49GPa y 70.09MPa respectivamente, destaca la muestra 3 que para los mismos datos alcanza valores de 5.75GPa y 134.10MPa respectivamente. En cuanto a la deformación de rotura, las diferencias son menores tal y como ha sucedido en los análisis previos, sin embargo también son favorables a la muestra 3. Las muestras 8 y 3 han reportado un valor máximo de deformación de rotura 0.017 y 0.022 respectivamente.

Durante la ejecución del trabajo se han podido apreciar una serie de factores a los que se puede atribuir los bajos resultados obtenidos en el compuesto con refuerzo de lino hilado manualmente:

1. **Los parámetros de fabricación escogidos para este material no son los óptimos.** Los parámetros de fabricación están basados, como se ha comentado anteriormente, en los parámetros de los compuestos con refuerzo de lino hilado industrialmente. No se han podido aplicar parámetros específicos de este material porque los elevados tiempos de producción han impedido efectuar análisis en términos de presión, composición y número de láminas de refuerzo. Además, estos análisis (en mayor medida el de composición) no se habrían podido ejecutar dada la heterogeneidad del hilo producido.
2. **La heterogeneidad del producto.** El hecho de no haber podido producir un hilo homogéneo condiciona la resistencia de los hilos individuales que componen cada lámina, esto tiene un gran efecto en las propiedades finales del compuesto. Muestra de ello son las diferencias entre los datos de coeficientes de variación. Mientras que la muestra 8 presenta un coeficiente de variación para el módulo de Young y la tensión máxima de valores 21% y 12% respectivamente, dichos valores en la muestra 3 son respectivamente 4.40% y 8.20%.

Tanto el elevado tiempo de fabricación, como la heterogeneidad del producto se dan por la ausencia de medios para el hilado de las fibras de lino y la elaboración de las láminas de este material. En conclusión, un estudio más completo sobre este tipo de materiales requiere diseñar herramientas de hilado y de fabricación adecuadas a este tipo de fibras. A pesar de estas dificultades este proyecto demuestra que es posible fabricar y caracterizar un material compuesto con este tipo de fibra. Se espera con ello motivar investigaciones más profundas sobre este tipo de material.

4.3. REFUERZO DE LINO TEJIDO

Cuando se considera la fabricación de compuestos laminares mediante procesos de compresión con placas calefactoras, el refuerzo basado en capas de tejido presenta múltiples ventajas respecto del refuerzo unidireccional. Por este motivo, el refuerzo de lino tejido ya ha sido utilizado en la investigación sobre materiales compuestos biodegradables. Los proyectos previos a este trabajo han desarrollado un proceso de fabricación con este refuerzo que

permite producir materiales con una resistencia a tracción de en torno a 100MPa en un tiempo de cinco minutos [18, 19]. Sin embargo, dada la complejidad de los parámetros de los que depende la fabricación por compresión con placas calefactoras, el proceso desarrollado en estas investigaciones puede que no constituya el óptimo. El proceso de fabricación escogido en este trabajo para la obtención de compuestos con refuerzo unidireccional de lino ha permitido producir muestras que alcanzan una resistencia a tracción de valor promedio 120MPa. Dadas las altas propiedades de las muestras producidas, se ha decidido aplicar este proceso para la fabricación de compuestos con refuerzo basado en lino tejido. El objetivo es comparar dicho proceso con el escogido en proyectos previos a partir de los resultados obtenidos.

Las diferencias entre el proceso de fabricación de compuestos con refuerzo unidireccional y el desarrollado en investigaciones previas son:

1. Parámetros de fabricación. Más adelante se detallan los parámetros escogidos para la fabricación de las muestras 9 y 10.

La muestra 9 ha sido fabricada siguiendo el proceso usado para los compuestos con refuerzo unidireccional. En dicha muestra, la temperatura, presión y número de láminas de refuerzo fueron seleccionados en base a la muestra 3 por sus altos resultados. En cuanto a la composición teórica, las investigaciones previas incluyen análisis de composición, en ellos se ha demostrado que los compuestos laminares con refuerzo de tejido de lino presentan propiedades muy elevadas para un contenido de PLA de valor próximo al 38% [18]. Hasta este punto no se había fabricado ninguna muestra con este tipo de refuerzo siguiendo el proceso utilizado para los compuestos con refuerzo unidireccional, por ello se desconocía las pérdidas de PLA que podían ocurrir. Para evitar el riesgo de producir una muestra con un contenido real de PLA muy inferior al descrito en anteriores proyectos (el tiempo dispuesto para la fabricación y estudio de los compuestos con refuerzo de lino tejido impedía fabricar varias muestras de este compuesto) se decidió dar un contenido teórico de PLA a la muestra 9 superior al escogido para la muestra 3. Esto se consiguió aumentando la masa de las láminas de PLA respecto a la masa de las láminas de la muestra 3.

La muestra 10 fue fabricada en base al proceso desarrollado en anteriores proyectos. Los parámetro de temperatura, presión, número de láminas de refuerzo y composición escogidos, están descritos en dichos proyectos [18].

2. Tamaño de láminas de PLA frente a tamaño de láminas de refuerzo.

El proceso utilizado para la fabricación de compuestos con refuerzo unidireccional obliga a utilizar láminas de refuerzo con las mismas dimensiones que las láminas de PLA. Las dimensiones de las láminas de la muestras 9 son constantes y fueron escogidas en base a la muestra 3.

El proceso desarrollado en anteriores proyectos permite fabricar compuestos con láminas de dimensiones independientes. Las dimensiones de las láminas de la muestra 10 fueron escogidas en base a dichos proyectos.

3. Número de ciclos de compresión.

Se desconoce el efecto que puede tener este parámetro en los productos fabricados. Sin embargo, se considera importante destacar que el proceso utilizado para los

compuestos con refuerzo unidireccional requiere un número de ciclos de compresión que depende del número de componentes (Lámina de PLA + Lámina de refuerzo + Lámina de PLA) de la muestra. Por otro lado, el proceso desarrollado en anteriores proyectos solo requiere un ciclo de compresión para la fabricación de cada muestra. La muestra 9 fue fabricada con el mismo número de ciclos de compresión que la muestra 3, mientras que la muestra 10 fue fabricada en un ciclo de compresión.

4. Uso de retenedores.

Las muestras fabricadas siguiendo el proceso desarrollado en anteriores proyectos posibilitan el uso de retenedores dado que el tamaño de las láminas de PLA es inferior al tamaño de las láminas de tejido. Esta diferencia respecto a las muestras fabricadas con el proceso desarrollado en este trabajo puede ser crucial en relación a las pérdidas de PLA del proceso.

Las muestras estudiadas (9 y 10), junto con las gráficas obtenidas tras procesar los datos de los ensayos, se detallan a continuación.

Muestra 9.

Material de refuerzo: Lino tejido.

Temperatura: 185°C

Presión: 4MPa

Número de capas: Dos láminas de refuerzo.

Tipo de matriz: Láminas de PLA intercaladas.

Porcentaje teórico de masa de refuerzo: Contenido teórico de 37.73% de lino.

4MPa (PLA 18g/Lino tejido/PLA 18g) x2

La muestra se constituye de dos componentes cada uno de los cuales está formado por una lámina de lino tejido de dimensiones 18x26cm y dos láminas de PLA (cada una de dimensiones 18x26cm). El valor de densidad superficial de lino tejido es $4.66 \times 10^{-4} \text{ (g/mm}^2\text{)}$. Cada lámina de lino tejido tiene una masa de valor 21.81g y cada lámina de PLA tiene una masa de valor 18g.

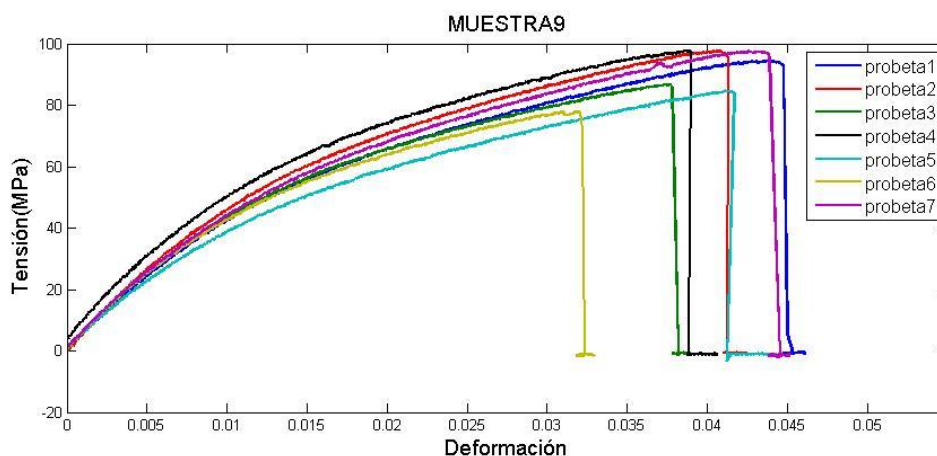


Figura 32. Diagramas tensión-deformación de las probetas de la muestra 9.

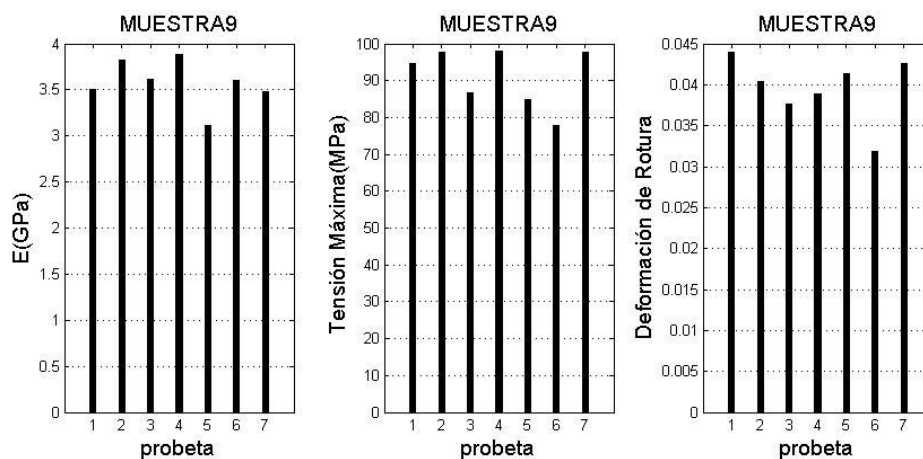


Figura 33. Representación gráfica de módulo de Young, tensión máxima y deformación de rotura de las probetas de la muestra 9.

Tabla 22. Datos estadísticos de las propiedades mecánicas de las probetas de la muestra 9.

Datos estadísticos	Módulo de Young(GPa)	Tensión Máxima(MPa)	Deformación de Rotura
Valor Máximo	3.88	97.93	0.044
Media	3.57	91.07	0.039
Desviación Estándar	0.25	7.94	0.004
Coefficiente de Variación(adimensional)	0.07	0.087	0.10

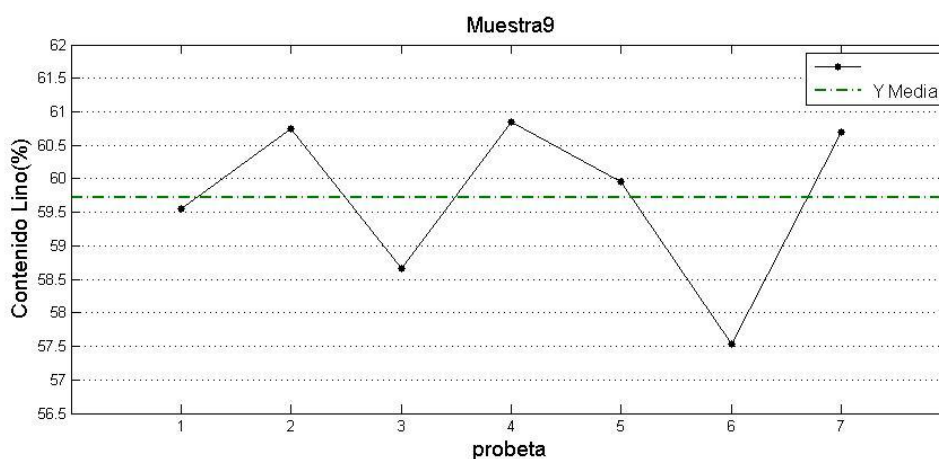


Figura 34. Diagrama de contenido de lino (%) de las probetas de la muestra 9.

La muestra 9, fabricada a partir del proceso desarrollado para compuestos con refuerzo unidireccional de lino presenta una distribución no homogénea de PLA, hecho que se aprecia

en la gráfica de la figura 34. Este fenómeno ocurre también durante la fabricación de las muestras con refuerzo unidireccional de lino y sus causas han sido atribuidas a la aplicación de presión no uniforme durante los ciclos de compresión del proceso. También debe hacerse mención a las pérdidas de PLA asociadas al proceso. El contenido teórico de PLA de la muestra (62.27%) se ve reducido en un valor promedio de 22%, siendo el contenido real promedio de PLA de las probetas de la muestra de valor 40.29%

Las causas de estas pérdidas pueden ser múltiples, es posible que estén relacionadas tanto con el proceso de fabricación como con las características del material de refuerzo (lino tejido). El estudio de estos factores no se ha podido efectuar dado el tiempo dispuesto para la fabricación. Sería interesante analizar estas variables en profundidad para optimizar el proceso de fabricación de los compuestos con refuerzo de lino tejido.

Muestra 10.

Material de refuerzo: Lino tejido.

Temperatura: 185°C

Presión: 16MPa

Número de capas: Cuatro láminas de refuerzo.

Tipo de matriz: Láminas de PLA intercaladas.

Porcentaje teórico de masa de refuerzo: Contenido teórico de 61.76% de lino.

16MPa (PLA 12g/Lino tejido/PLA 12g/Lino tejido/ PLA 12g/Lino tejido/ PLA 12g/Lino tejido/ PLA 12g)

La muestra consta de cuatro láminas de lino tejido, cada una de dimensiones 20x26cm y cinco capas de PLA, cada una de dimensiones 16x20cm. Cada lámina de lino tejido tiene una masa de valor 24.23g y cada lámina de PLA tiene una masa de valor 12g.

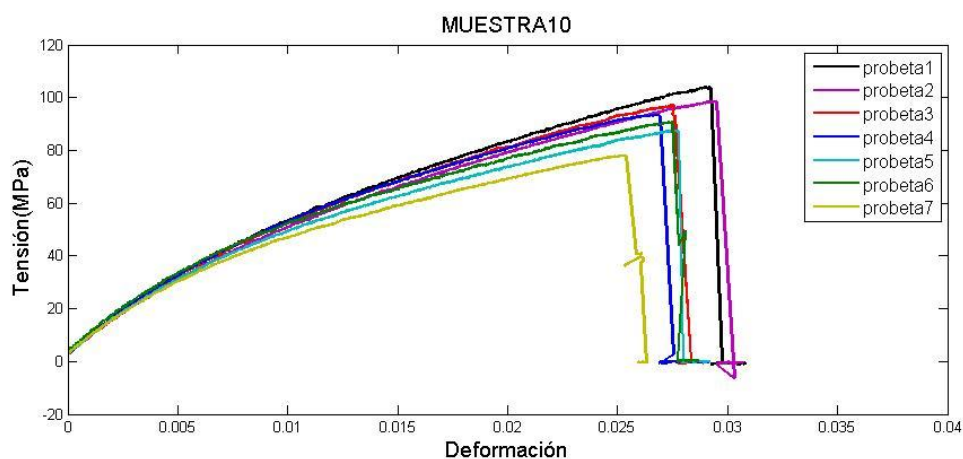


Figura 35. Diagramas tensión-deformación de las probetas de la muestra 10.

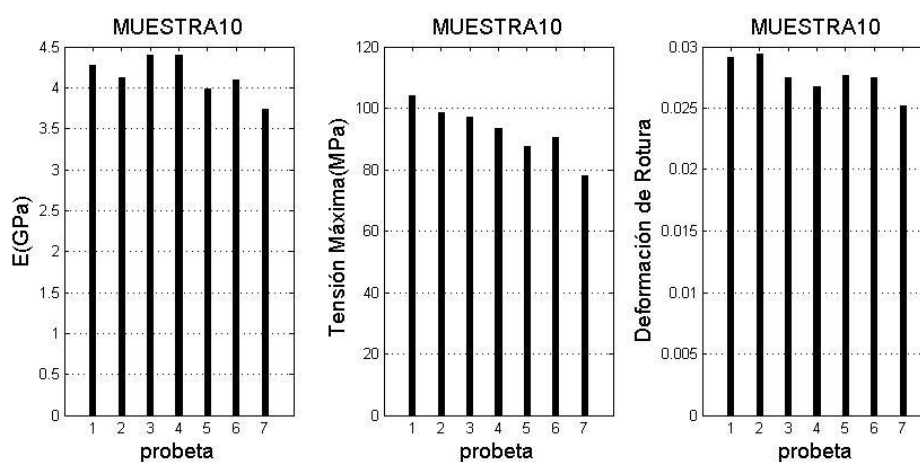


Figura 36. Representación gráfica de módulo de Young, tensión máxima y deformación de rotura de las probetas de la muestra 10.

Tabla 23. Datos estadísticos de las propiedades mecánicas de las probetas de la muestra 10.

Datos estadísticos	Módulo de Young(GPa)	Tensión Máxima(MPa)	Deformación de Rotura
Valor Máximo	4.39	103.9	0.029
Media	4.14	92.72	0.028
Desviación Estándar	0.24	8.4	0.0014
Coefficiente de Variación(adimensional)	0.058	0.09	0.05

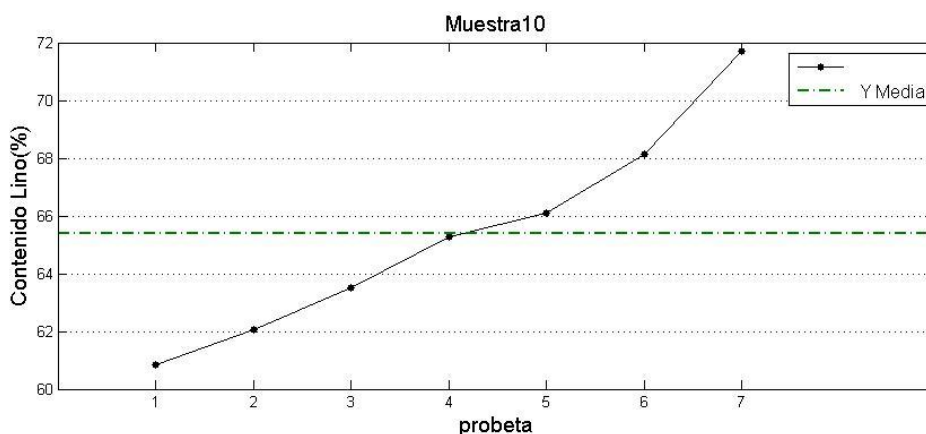


Figura 37. Diagrama de contenido de lino (%) de las probetas de la muestra 10.

La muestra 10 ha sido fabricada a partir del proceso desarrollado en investigaciones previas sobre compuestos laminares producidos mediante compresión. Al igual que en la muestra 9, la gráfica de la figura 37 refleja la distribución no uniforme de PLA tras el proceso. De nuevo las causas de esta distribución se han atribuido a la aplicación de presión no uniforme durante los

ciclos de compresión. Tal y como se ha observado en el análisis de compuestos con refuerzo unidireccional las gráficas de las figuras 34 y 37 muestran que el PLA se ha distribuido de forma diferente en las muestras 9 y 10. Entre las posibles causas de esta distribución desigual se ha hecho mención en anteriores apartados a la colocación indebida de las láminas de PLA y refuerzo respecto de las placas de la máquina de ensayos antes de iniciar el ciclo de compresión.

Las mejoras de utillaje planteadas en el análisis de compuestos con refuerzo unidireccional de lino podrían resolver los problemas de heterogeneidad de las muestras (en cuanto a su composición tras el proceso) además de mejorar el proceso para obtener productos con una distribución de PLA similar.

En relación a las pérdidas de PLA, el proceso utilizado para la fabricación de la muestra 10 ha generado una reducción del contenido teórico de PLA (38.24%) en un valor promedio de 3.61%, siendo el contenido real promedio de PLA de la muestra 34.63%

Esto constituye una diferencia importante respecto al proceso utilizado en la fabricación de la muestra 9. A pesar de que ambos procesos (utilizados en muestras 9 y 10) hayan supuesto problemas similares en cuanto a la distribución de PLA en las muestras, la alta cantidad de desechos de PLA durante la fabricación de la muestra 9 destaca las ventajas del proceso desarrollado en investigaciones previas para la producción de compuestos laminares con refuerzo de lino tejido.

En relación a las propiedades de las muestras, las diferencias más significativas se aprecian en los resultados de módulo de Young. La muestra 9 presenta un valor máximo y promedio de módulo de Young 3.88GPa y 3.57GPa respectivamente, mientras que dichos datos para la muestra 10 toman valores 4.39GPa y 4.14GPa respectivamente. También pueden observarse diferencias en los valores de deformación de rotura de las muestras. La deformación de rotura promedio de las muestras 9 y 10 toma valores 0.039 y 0.028 respectivamente. Los valores de tensión máxima de ambas muestras son similares, siendo el valor promedio de tensión máxima de las muestras 9 y 10, 91.07MPa y 92.72MPa respectivamente. Asimismo, los valores de coeficiente de variación reflejan una distribución de rigidez y tensión máxima similar en las muestras 9 y 10. Debido a la influencia de la composición en las propiedades de los compuestos laminares, y dadas las diferencias entre la composición real de las muestras 9 y 10, no pueden sacarse conclusiones a cerca de las ventajas que supone (sobre las propiedades del compuesto producido) el uso de un proceso respecto al otro en la fabricación de compuestos laminares con lino tejido.

Aparentemente no se puede aprovechar ninguna característica del proceso empleado para la fabricación de la muestra 9 para mejorar el proceso desarrollado en investigaciones previas. En cuanto a las propiedades de los compuestos, no se aprecian diferencias claras entre ambos procesos a las que pueda atribuirse la variación de propiedades de las muestras. Además, los resultados destacan el proceso desarrollado en investigaciones previas dadas las bajas pérdidas de PLA que supone.

Sería interesante comparar dos muestras con refuerzo de lino tejido producidas bajo los mismos parámetros de temperatura, presión, número de láminas de refuerzo y composición,

pero con diferencias en la relación de tamaños entre las láminas de PLA y refuerzo, en el número de ciclos de compresión del proceso y en el uso de retenedores. El interés de este estudio radica en las diferencias habidas entre las pérdidas de PLA del proceso utilizado para fabricar las muestras 9 y 10. Si todos los parámetros excepto la relación de tamaños de los componentes laminares, el número de ciclos de compresión y el uso de retenedores se mantienen constantes y los resultados siguen reportando diferencias en las pérdidas de PLA de ambos procesos, se podrían aplicar ciertas modificaciones (componentes laminares de tamaños independientes y reducción de ciclos de compresión) en el proceso para la fabricación de compuestos con refuerzo unidireccional y evaluar su efecto sobre las pérdidas de PLA. Es decir, comprobar si pueden aprovecharse características del proceso desarrollado en investigaciones previas, para optimizar el proceso de fabricación de compuestos con refuerzo unidireccional desarrollado en este trabajo.

Una vez se han fabricado las muestras con refuerzo de lino tejido, es interesante compararlas con las muestras de refuerzo unidireccional de lino. En especial es interesante la comparación con la muestra 10, pues ésta ha sido fabricada a partir del proceso desarrollado en investigaciones previas [18, 19]. Para ello se toma como referencia la muestra 3 pues es la que ha reportado mejores propiedades.

En términos de rigidez y tensión máxima, la muestra fabricada con refuerzo unidireccional destaca al presentar valores promedios de módulo de Young y tensión máxima 5.4GPa y 122.2MPa respectivamente. Estos mismos datos para la muestra 10 toman valores 4.14GPa y 92.72MPa respectivamente. Si estudiamos los coeficientes de variación de ambas muestras se pueden apreciar resultados similares. La muestra 3 presenta un coeficiente de variación para los datos de módulo de Young y tensión máxima de valor 4.4% y 8.2% respectivamente, mientras que dichos coeficientes para la muestra 10 toman valores 5.8% y 9% respectivamente. Esto es señal de que ambas muestras presentan una uniformidad similar en cuanto a sus propiedades mecánicas.

En relación al proceso de fabricación, las diferencias más destacadas se dan al analizar los tiempos de producción y las pérdidas de PLA de ambos procesos.

La muestra 3 presenta un tiempo de 2.17 horas con una persona trabajando para la elaboración y apilamiento de las láminas de refuerzo que la constituyen. El tiempo requerido para la elaboración de las láminas de PLA que la conforman es aproximadamente 20 minutos de trabajo en la máquina de ensayos. Por último, se necesita un tiempo de 15 minutos en la máquina de ensayos para aplicar los ciclos de compresión tras los cuales se obtiene la muestra.

En cuanto al tiempo de producción de la muestra 10, son necesarias 0.33 horas con una persona trabajando para la elaboración y apilamiento de las láminas de refuerzo que la constituyen. El tiempo requerido para la elaboración de las láminas de PLA que la conforman es aproximadamente 25 minutos de trabajo en la máquina de ensayos. Por último, se necesita un tiempo de 5 minutos en la máquina de ensayos para aplicar el ciclo de compresión tras el cual se obtiene la muestra.

Estas diferencias reflejan la necesidad de diseñar herramientas de elaboración y apilamiento de láminas de refuerzo unidireccional que permitan reducir los tiempos de producción.

En cuanto a las pérdidas de PLA, el proceso aplicado para la fabricación de la muestra 10 genera una reducción del contenido teórico de PLA en un valor promedio de 3.61%. Por otro lado la muestra 3 reduce su contenido teórico de PLA en un valor promedio de 10.22%. Como se ha explicado anteriormente las pérdidas pueden deberse a múltiples factores como el tipo de fibra, parámetros del proceso etc. Como se ha expuesto, sería interesante realizar un estudio en mayor profundidad de estos factores para comprobar si pueden aprovecharse características del proceso desarrollado en investigaciones previas [18, 19] para optimizar el proceso de fabricación de compuestos con refuerzo unidireccional desarrollado en este trabajo.

A pesar de las diferencias debidas a los procesos de fabricación de las muestras 3 y 10. Los resultados relativos a las propiedades mecánicas de las muestras reflejan que ha sido posible fabricar un compuesto con refuerzo unidireccional de lino equiparable a los compuestos biodegradables producidos en proyectos previos [18, 19].

4.4. REFUERZO UNIDIRECCIONAL DE ESPARTO

Como se ha comentado en el apartado de fabricación, ya se han realizado investigaciones sobre materiales compuestos con refuerzo de esparto. Sin embargo, En estos proyectos el compuesto se obtiene por extrusión e inyección, por este motivo se puede utilizar como refuerzo directamente las fibras de esparto. Las fibras utilizadas en estos estudios son obtenidas mediante procesos de cocción y el uso de desfibradores [36].

Para los procesos de compresión ejecutados con la máquina de ensayos se requiere el esparto constituyendo láminas. Tal y como ocurre con el lino, trabajar las fibras del esparto supone muchos problemas para constituir estas láminas. Por ello es necesaria la cohesión de las fibras para generar hilos que puedan alinearse formando capas. Dada la complejidad de los procesos de hilado con fibras de esparto se decide trabajar directamente con sus tallos. Se han fabricado muestras con refuerzo basado en dos tipos de tallo. El primer tipo lo constituyen tallos procedentes de esparto en bruto. El segundo tipo corresponde a tallos que han sido sometidos a un proceso de secado y posteriormente han sido triturados.

4.4.1. TALLOS DE ESPARTO EN BRUTO

En primer lugar se ha fabricado el compuesto con refuerzo basado en tallos de esparto en bruto. La elaboración de las láminas con este material se ha visto dificultada por la rigidez de los tallos que ha impedido orientarlos en la dirección deseada. Además la rigidez de los tallos dificulta la adhesión con el material utilizado para conformar las láminas de refuerzo, lo que ha impedido mantenerlos en una posición fija. Por el mismo motivo también ha sido compleja la manipulación de las láminas durante su apilamiento. Durante este paso se desprenden una alta cantidad de tallos. Otro problema derivado del uso de este material es que las láminas de refuerzo producidas han presentado una masa que depende de la cantidad de tallos utilizada durante su elaboración. Esto ha impedido calcular el valor de la densidad superficial de las láminas producidas con este material. Dado que el dato de la densidad superficial se desconoce, no es posible calcular la composición real de las probetas producidas. A estos problemas debe sumarse que tras efectuar el proceso de compresión los tallos se dispersan en la muestra, además no se produce cohesión con el material bioplástico, lo que puede deberse

a que las propiedades de este tipo de fibra hagan que no sea compatible con la matriz escogida. El resultado tras el proceso de compresión es el de un producto muy heterogéneo dado la dispersión de los tallos de esparto y con muchos defectos como la orientación inadecuada de los tallos e inclusiones de aire.



Figura 38. Probeta extraída de la muestra del compuesto con fibras de esparto en bruto.

Dados todos los problemas que ha conllevado el uso de este material con los medios disponibles, se decide detener la producción y estudio de las muestras con refuerzo basado en tallos de esparto en bruto. A pesar de interrumpir, por los motivos descritos, el estudio de este tipo de compuesto, a continuación se muestran los detalles del proceso de fabricación de la muestra con este refuerzo.

Muestra 11.

Material de refuerzo: Tallos de esparto en bruto.

Temperatura: 185°C

Presión: 8MPa

Número de capas: Dos láminas de refuerzo.

Tipo de matriz: Láminas de PLA intercaladas.

Porcentaje teórico de masa de refuerzo: Al no conocer la densidad superficial de las láminas de refuerzo no ha sido posible calcular la composición teórica de la muestra.

4MPa (PLA 7g/Esparto/PLA7g/Esparto/PLA7g)

La muestra se constituye de dos láminas de tallos de esparto en bruto y tres láminas de PLA. Las láminas de PLA tienen unas dimensiones de 18x26cm y una masa de 7g.

4.4.2. TALLOS DE ESPARTO MACHACADO

La fabricación de los compuestos con tallos de esparto que han sido sometidos a procesos de secado y triturado ha supuesto muchas ventajas frente a la fabricación con los tallos de esparto en bruto. En primer lugar los tallos secos y triturados presentan menor rigidez que los tallos en bruto, gracias a esto se pueden orientar en la dirección deseada. Además se adhieren fácilmente al material usado para conformar las láminas de refuerzo lo que permite mantener los tallos en una posición fija permanentemente y hace posible su manipulación durante el apilamiento con las láminas de PLA. Otra ventaja es que ha sido posible calcular la densidad superficial de las láminas constituidas por este tipo de tallo, al presentar las láminas de mismas dimensiones una masa similar. Este dato resulta en un valor $3.53 \text{ e-4 (g/mm}^2\text{)}$. Los compuestos producidos tras el proceso de compresión son homogéneos pues los tallos no se dispersan en la muestra a diferencia de los tallos en bruto. Asimismo los tallos que han sido sometidos a procesos de secado y triturado tienen mayor cohesión con el PLA y no generan inclusiones de aire en el compuesto a diferencia de los tallos en bruto.

Es importante destacar que la fabricación de los compuestos con refuerzo basado en esparto, tiene el objetivo de demostrar que es posible la producción de este tipo de materiales con el proceso, basado en la compresión con capas calefactoras, descrito en anteriores apartados. Su caracterización mediante ensayos de tracción se realiza en un intento por demostrar que los compuestos producidos presentan ciertas propiedades equiparables a las de otros materiales compuestos biodegradables. La intención por tanto de producir y caracterizar estos compuestos es la de motivar futuras investigaciones acerca de materiales compuestos con refuerzo de esparto.

Dado que el tiempo disponible para fabricar estos compuestos ha sido limitado, se ha decidido fabricar varias muestras bajo los mismos parámetros de presión y temperatura. Asimismo, tampoco se ha contado con medios óptimos para la fabricación de estos materiales. Por estos motivos, solo ha sido posible fabricar compuestos con refuerzo unidireccional de esparto modificando los parámetros de composición y número de láminas simultáneamente. Durante el estudio del compuesto con refuerzo unidireccional de lino, el parámetro de composición se ajustaba variando la masa de las láminas de PLA y manteniendo constante el número de láminas de refuerzo. El motivo es que el número de láminas de refuerzo del compuesto constituía otro parámetro a analizar. Un estudio más completo acerca de materiales compuestos con refuerzo de esparto requeriría un análisis similar. Sin embargo, tal y como se ha explicado, dado que el tiempo y los medios disponibles han sido limitados, se ha decidido simplificar el análisis de los parámetros de fabricación de los compuestos con refuerzo de esparto. De esta forma el parámetro de composición se ha modificado manteniendo constante la masa de las láminas de PLA y variando la proporción entre el número de láminas de refuerzo y el número de láminas de PLA. Las muestras estudiadas, junto con las gráficas correspondientes, se detallan a continuación.

Muestra 12.**Material de refuerzo:** Tallos de esparto machacados.**Temperatura:** 185°C**Presión:** 4MPa**Número de capas:** Cuatro láminas de refuerzo.**Tipo de matriz:** Láminas de PLA intercaladas.**Porcentaje teórico de masa de refuerzo:** Contenido teórico de 64.73% de esparto.**4MPa (PLA 12g/Esparto/Esparto/PLA 12g/Esparto/Esparto/PLA12g)**

La muestra se constituye de cuatro láminas de esparto y tres láminas de PLA. Las dimensiones de las láminas de esparto y PLA son 18x26cm. Cada lámina de esparto tiene una masa de valor 16.52g y cada lámina de PLA tiene una masa de valor 12g.

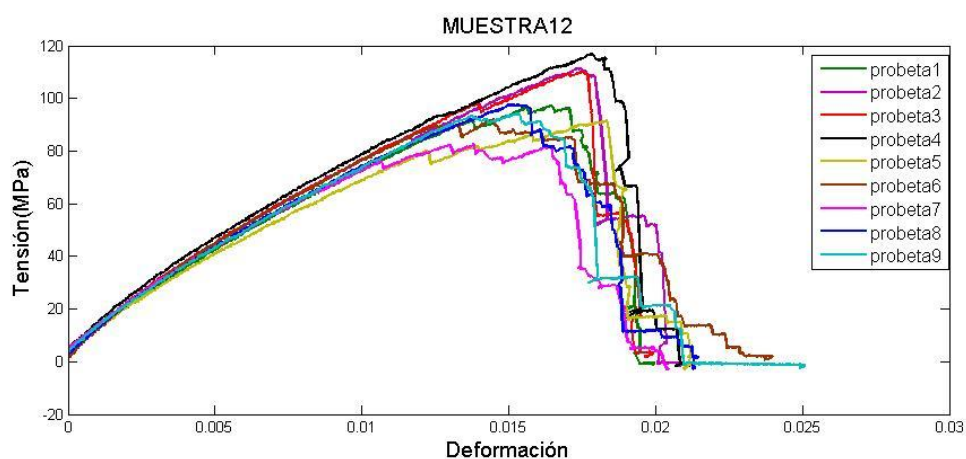


Figura 39. Diagramas tensión-deformación de las probetas de la muestra 12.

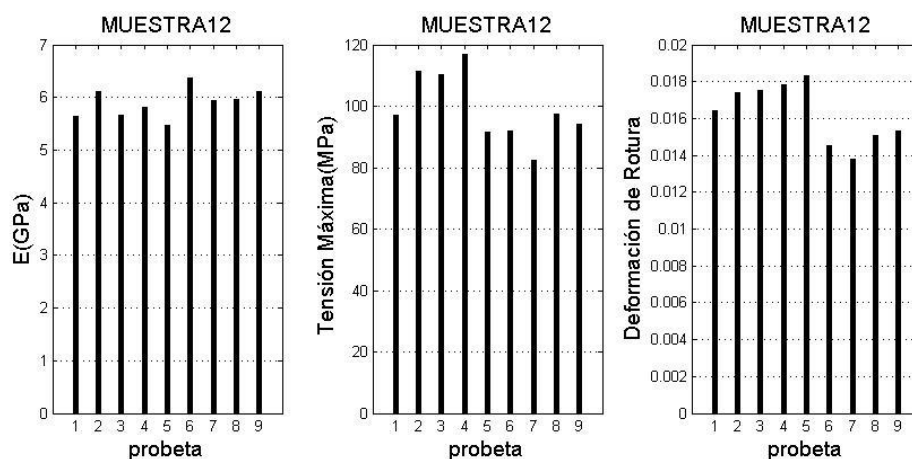


Figura 40. Representación gráfica de módulo de Young, tensión máxima y deformación de rotura de las probetas de la muestra 12.

Tabla 24. Datos estadísticos de las propiedades mecánicas de las probetas de la muestra 12.

Datos estadísticos	Módulo de Young(GPa)	Tensión Máxima(MPa)	Deformación de Rotura
Valor Máximo	6.36	116.70	0.018
Media	5.90	99.25	0.016
Desviación Estándar	0.2795	11.18	0.0016
Coefficiente de Variación(adimensional)	0.047	0.11	0.099

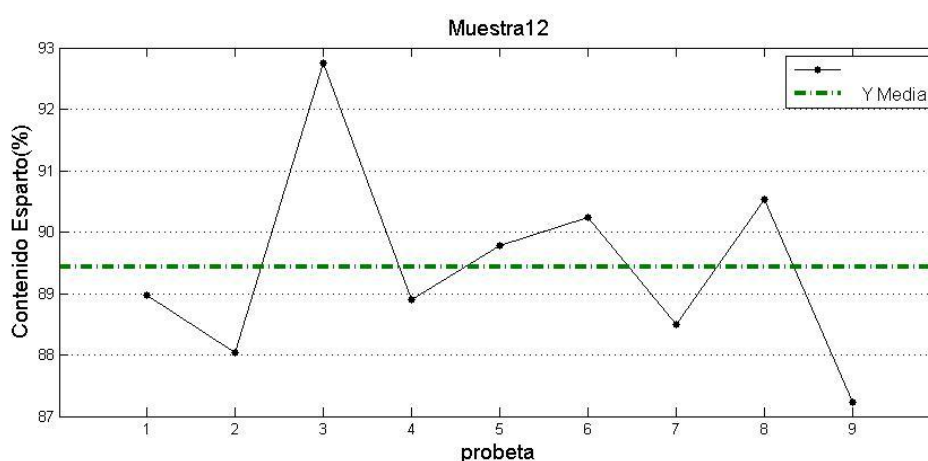


Figura 41. Diagrama de contenido de esparto (%) de las probetas de la muestra 12.

La gráfica de la figura 41 refleja la heterogeneidad de la muestra producida en términos de composición. Tal y como se ha comentado en el análisis de los compuestos con refuerzo unidireccional de lino, las causas de esta distribución han sido atribuidas a la aplicación de presión no uniforme durante el ciclo de compresión del proceso de fabricación. También es importante destacar las pérdidas de PLA ocurridas durante el proceso de fabricación. Esta muestra ha sido definida con un contenido teórico de PLA de valor 35.27%, dato que se ha visto reducido en un valor promedio de 21.71%. Como se ha comentado en el análisis de los compuestos con refuerzo unidireccional de lino, los factores a los que pueden atribuirse estas pérdidas pueden ser múltiples, y pueden estar relacionados con las características de las fibras, con los parámetros del proceso de fabricación etc.

El estudio de estos parámetros no se ha podido efectuar dado el tiempo dispuesto para la fabricación. Sería interesante analizar estas variables para optimizar el proceso de fabricación de los materiales descritos.

Muestra 13.**Material de refuerzo:** Tallos de esparto machacados.**Temperatura:** 185°C**Presión:** 4MPa**Número de capas:** Tres láminas de refuerzo.**Tipo de matriz:** Láminas de PLA intercaladas.**Porcentaje teórico de masa de refuerzo:** Contenido teórico de 67.37% de esparto.**4MPa (PLA 12g/Esparto/Esparto/Esparto/PLA 12g)**

La muestra se constituye de tres láminas de esparto y dos láminas de PLA. Las dimensiones de las láminas de esparto y PLA son 18x26cm. Cada lámina de esparto tiene una masa de valor 16.52g y cada lámina de PLA tiene una masa de valor 12g.

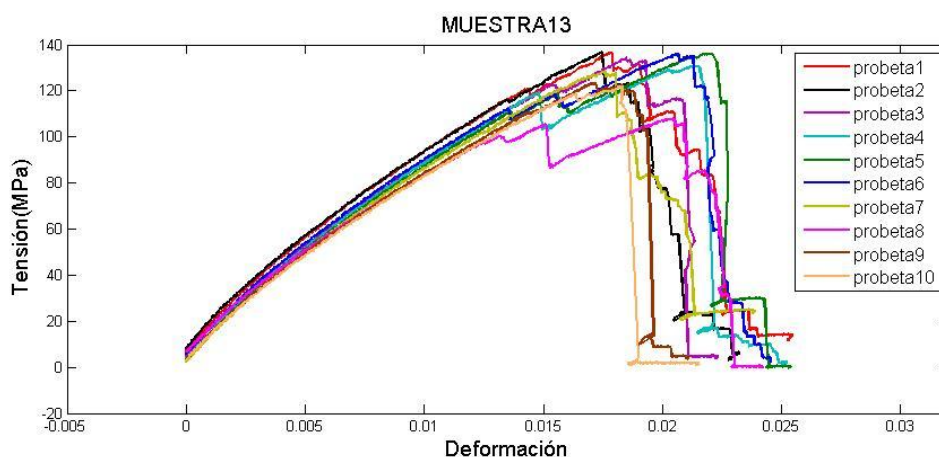


Figura 42. Diagramas tensión-deformación de las probetas de la muestra 13.

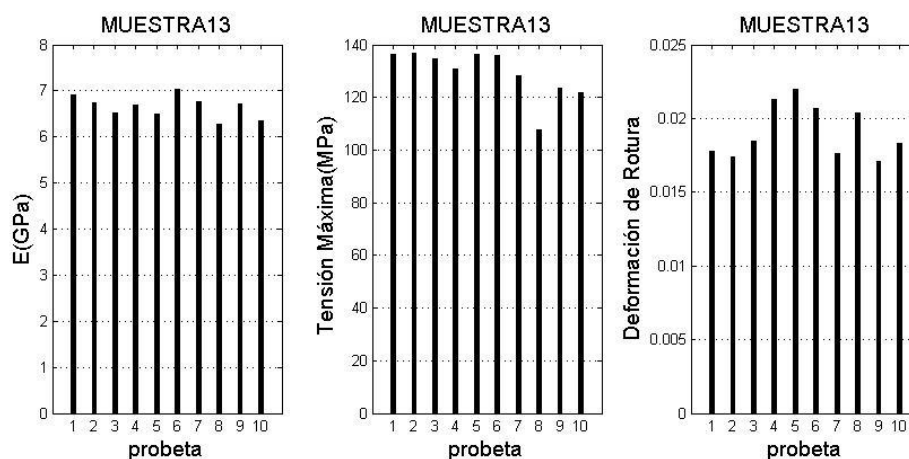


Figura 43. Representación gráfica de módulo de Young, tensión máxima y deformación de rotura de las probetas de la muestra 13.

Tabla 25. Datos estadísticos de las propiedades mecánicas de las probetas de la muestra 13.

Datos estadísticos	Módulo de Young(GPa)	Tensión Máxima(MPa)	Deformación de Rotura
Valor Máximo	7.04	136.8	0.022
Media	6.65	129.3	0.019
Desviación Estándar	0.24	9.346	0.0018
Coefficiente de Variación(adimensional)	0.036	0.072	0.095

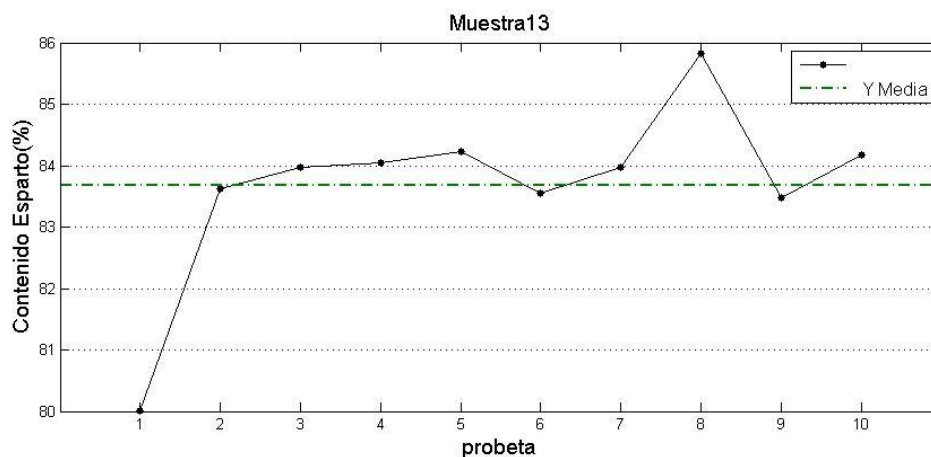


Figura 44. Diagrama de contenido de esparto (%) de las probetas de la muestra 13.

La gráfica de la figura 44 indica que la muestra 13 presenta menos heterogeneidad en cuanto a su composición que la muestra 12. Como se ha comentado en anteriores apartados esta diferencia puede deberse al efecto combinado de aplicación de presión no uniforme en la máquina de ensayos y a la situación de la muestra respecto de las placas durante el ciclo de compresión.

Esta muestra se ha definido en base a la composición teórica de la muestra 12. La muestra 13 presenta un contenido teórico de PLA de valor 32.63%. El propósito de reducir el contenido teórico de PLA es comprobar los efectos que ello conlleva sobre las propiedades de la muestra. Como se ha comentado anteriormente la falta de medios y de un proceso óptimo de fabricación ha obligado a que el contenido teórico de PLA de la muestra se modifique variando la proporción entre el número de láminas de refuerzo y el número de láminas de PLA. La muestra 12 presenta una proporción de 4/3 (láminas de refuerzo frente a láminas de material bioplástico) y la muestra 13 presenta una proporción de 3/2. De esta forma se consigue reducir el contenido de PLA teórico.

Al igual que en la muestra 12 es importante destacar las pérdidas de PLA producidas durante el proceso de fabricación. En el caso de la muestra 13 el contenido teórico de PLA se ha visto reducido en un valor promedio de 16.32%. El estudio de las causas de estas pérdidas no es el objeto de este proyecto dado el limitado tiempo del que se ha dispuesto para hacer el análisis. Sin embargo es interesante comprobar que al incrementar la proporción de láminas de

refuerzo frente a láminas de PLA se reducen las pérdidas de material bioplástico. Como se ha comentado durante el análisis de los compuestos con refuerzo unidireccional de lino, una de las posibles causas de estas pérdidas es la densidad de fibras de las láminas. Aunque las muestras 12 y 13 presentan la misma densidad superficial en sus láminas, modificar la proporción entre las láminas de refuerzo y las láminas de PLA supone una variación de la densidad de fibras en la muestra.

A partir de lo anterior puede sacarse una conclusión aparente. Incrementar la densidad de fibras de esparto de las muestras supone una reducción de pérdidas de PLA. Sin embargo, el análisis realizado sobre compuestos con refuerzo unidireccional de lino reflejaba lo contrario, un incremento de densidad de fibras de lino de la muestra conllevaba el aumento de las pérdidas de PLA. Todo ello señala la necesidad de estudiar con más detenimiento los factores asociados a las pérdidas de material bioplástico con el fin de optimizar el proceso.

Muestra 14.

Material de refuerzo: Tallos de esparto machacados.

Temperatura: 185°C

Presión: 4MPa

Número de capas: Cuatro láminas de refuerzo.

Tipo de matriz: Láminas de PLA intercaladas.

Porcentaje teórico de masa de refuerzo: Contenido teórico de 73.36% de esparto.

4MPa (PLA 12g/Esparto/ Esparto / Esparto / Esparto /PLA 12g)

La muestra se constituye de cuatro láminas de esparto y dos láminas de PLA. Las dimensiones de las láminas de esparto y PLA son 18x26cm. Cada lámina de esparto tiene una masa de valor 16.52g y cada lámina de PLA tiene una masa de valor 12g.

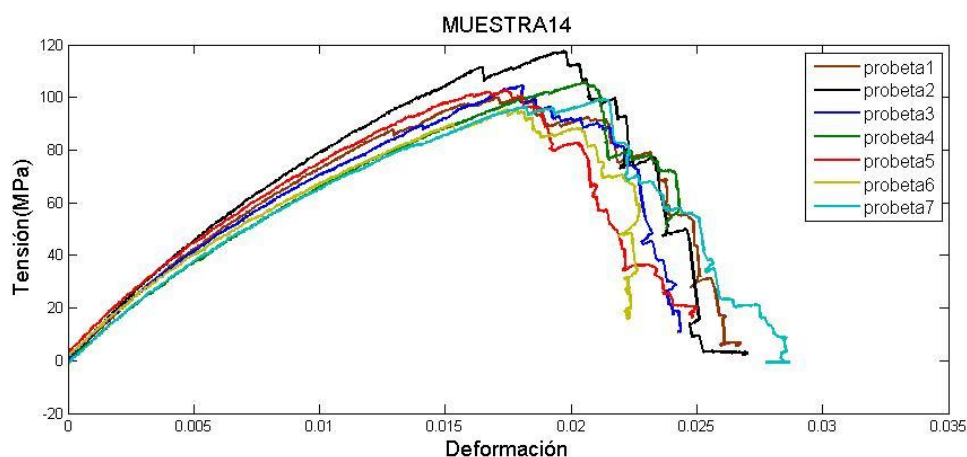


Figura 45. Diagramas tensión-deformación de las probetas de la muestra 14.

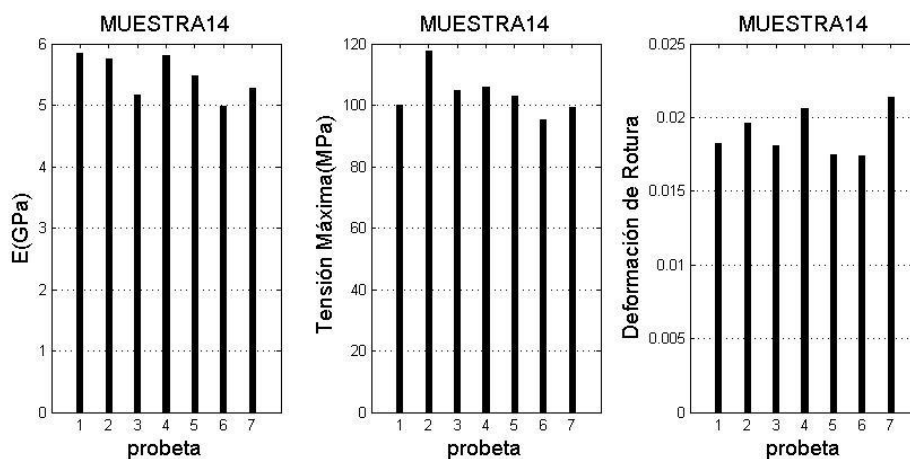


Figura 46. Representación gráfica de módulo de Young, tensión máxima y deformación de rotura de las probetas de la muestra 14.

Tabla 26. Datos estadísticos de las propiedades mecánicas de las probetas de la muestra 14.

Datos estadísticos	Módulo de Young(GPa)	Tensión Máxima(MPa)	Deformación de Rotura
Valor Máximo	5.84	117.5	0.021
Media	5.47	103.6	0.019
Desviación Estándar	0.3392	7.09	0.0016
Coefficiente de Variación(adimensional)	0.062	0.068	0.084

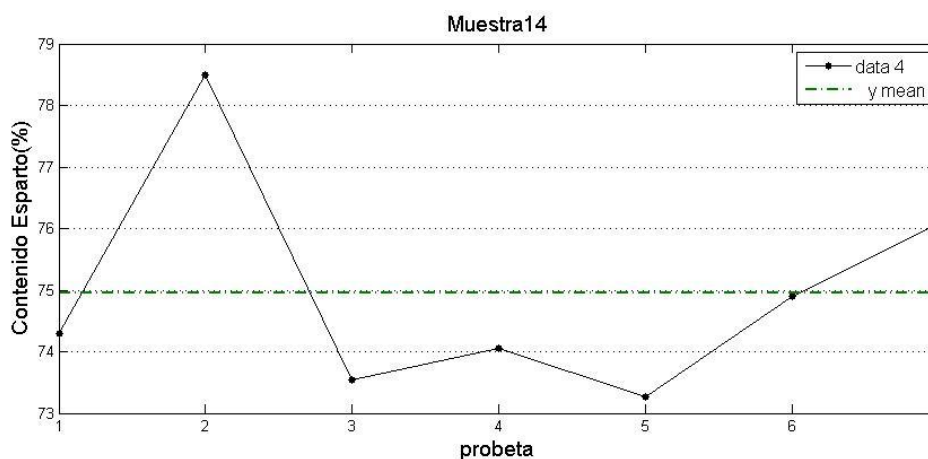


Figura 47. Diagrama de contenido de esparto (%) de las probetas de la muestra 14.

La gráfica de la figura 47 ejemplifica al igual que las gráficas de las figuras 41 y 44 los problemas asociados a los medios disponibles para llevar a cabo la producción. Son una muestra de la mala distribución de PLA durante los ciclos de compresión y de la colocación indebida de las muestras en la máquina de ensayos. A falta de medios óptimos los resultados asociados a la composición de las muestras no presentan mayor similitud. Al igual que en la

muestra 13, la muestra 14 se ha definido en base a la composición teórica de las anteriores (12 y 13). La muestra 14 presenta un contenido teórico de PLA de valor 26.64%. El propósito de reducir el contenido de PLA ya ha sido mencionado (comprobar los efectos que ello conlleva sobre las propiedades de la muestra).

En lo relativo a las pérdidas de PLA, lo anteriormente detallado en el análisis de la muestra 13 se corrobora ante los resultados de la muestra 14. La proporción entre el número de láminas de refuerzo y el número de láminas de PLA aumenta en la muestra 14 (4/2) respecto a la muestra 13 (3/2). Este incremento de la densidad de fibras ha supuesto una reducción de las pérdidas de material bioplástico. El contenido teórico de PLA de la muestra 14 se ha visto reducido en un valor promedio de 1.59%. Dato que destaca frente a los porcentajes de la muestra 12 (21.71%) y de la muestra 13 (16.32%).

En relación a las propiedades de las muestras. Durante la fabricación de los compuestos con refuerzo basado en esparto se apreció un incremento de la rigidez y tensión máxima resistida por los materiales a medida que se reducía el contenido teórico de PLA de las muestras. Los valores promedio de módulo de Young y de tensión máxima de la muestra 12 (contenido teórico de PLA 35.27%) son respectivamente 5.90GPa y 99.25MPa, mientras que estos mismos datos para la muestra 13 (contenido teórico de PLA 32.63%) toman valores 6.65GPa y 129.3MPa respectivamente. Estos resultados motivaron la fabricación de una nueva muestra con un contenido teórico de PLA inferior al de la muestra 13. La muestra 14 (contenido teórico de PLA 26.64%) presenta valores promedio de módulo de Young y de tensión máxima 5.47GPa y 103.6MPa respectivamente. A pesar de que los resultados de la muestra son muy elevados, se decide detener en este punto la fabricación de muestras con refuerzo de esparto al ofrecer la muestra 14 propiedades inferiores a la muestra 13. En cuanto a la deformación de rotura, los resultados no ofrecen diferencias significativas entre las tres muestras. El valor promedio de deformación de rotura de la muestra 12 es 0.016 dicho dato en la muestra 13 toma valor 0.019 y en la muestra 14 toma valor 0.019. Los resultados relacionados con los coeficientes de variación de las muestras reflejan que las muestras 12, 13 y 14 presentan una homogeneidad similar en cuanto a sus propiedades mecánicas.

La composición real de las muestras fue conocida después de procesar los resultados de todas las probetas de las muestras. A pesar de que las pérdidas asociadas al proceso de fabricación eran conocidas, los valores de estas no se cuantificaron hasta procesar los resultados de las probetas. Como consecuencia, durante la fabricación de las muestras, la mejora de las propiedades del compuesto con refuerzo de esparto se atribuyó a la reducción del contenido teórico de PLA. Tras conocer la composición real de las muestras se aprecia que en realidad, el incremento de la proporción de las láminas de refuerzo frente a las láminas de PLA supone un incremento del contenido de PLA (asociado a la reducción de pérdidas explicada anteriormente), por lo que la mejora de las propiedades de los compuestos está vinculada realmente a un incremento del contenido de PLA. La muestra 12 presenta un contenido real promedio de PLA de valor 10.56% este dato para la muestra 13 (que presenta las mejores propiedades) alcanza el valor 16.31% mientras que para la muestra 14 toma valor 25.05%. Estas notables diferencias entre la composición teórica y real de las muestras advierte la necesidad de optimizar el proceso de fabricación en vista de nuevas investigaciones.

Resulta también interesante el comportamiento de los compuestos con refuerzo de esparto durante el ensayo de tracción uniaxial. Si se observan las gráficas de tensión frente a deformación aportadas, puede apreciarse que tras llegar al valor de tensión máxima la curva no decae hasta valores nulos de resistencia sino que llega a valores de resistencia intermedios entre la tensión máxima y los valores nulos. Esto se refleja en la gráfica como una sucesión de picos en la curva para valores de deformación superiores al que se corresponde con la tensión máxima resistida. Este comportamiento se debe a que la rotura producida en el punto de tensión máxima no supone el fallo de todas las fibras de la probeta. Los picos se corresponden a las sucesivas fracturas de fibras hasta alcanzar el valor de resistencia nulo. La siguiente gráfica muestra este comportamiento frente al fallo de los compuestos fabricados con refuerzo de lino.

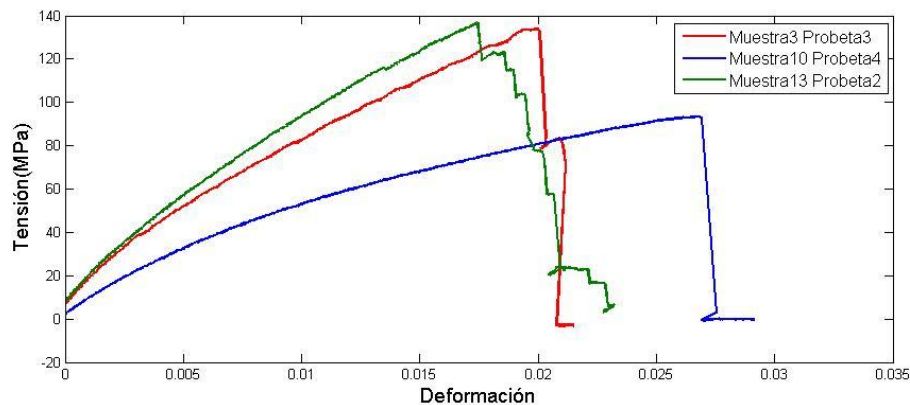


Figura 48. Diagramas tensión-deformación de probetas extraídas de muestras con distintos tipos de refuerzo.

La probeta de la muestra 10 corresponde a un material con refuerzo de lino tejido, la gráfica refleja el fallo simultáneo de todos sus elementos de refuerzo. La probeta de la muestra 3 corresponde a un material con refuerzo unidireccional de lino, a pesar de tener un comportamiento similar al de los compuestos con refuerzo de tejido las gráficas de este tipo de muestras presentan picos de resistencia tras alcanzar la tensión máxima. Al igual que en los compuestos con refuerzo de esparto, estos picos se deben al fallo no simultáneo de las fibras. Por último la probeta de la muestra 13 presenta el comportamiento más destacado en este sentido. Las causas de este comportamiento pueden ser múltiples. Puede apreciarse que tras el proceso de fabricación, las muestras con refuerzo unidireccional de esparto no presentan todas las fibras con la misma orientación. De igual modo aunque en menor medida las fibras de refuerzo unidireccional de lino tampoco adoptan la misma dirección en las muestras (se producen pequeñas variaciones en su orientación, aunque en ningún caso tan considerable como las que sufren las fibras de esparto). La siguiente imagen muestra la orientación que adoptan las fibras de esparto en los compuestos producidos.



Figura 49. Orientación de las fibras de esparto secado en las muestras que presentan este refuerzo.

Estas diferencias en la orientación de las fibras podrían ser la causa de estados tensionales que expliquen los modos de fallo revelados en la figura 48. Los medios y el proceso de fabricación no han permitido producir materiales más homogéneos en este sentido. Se espera que en futuras investigaciones se optimice el proceso de fabricación para evitar modos de fallo inesperados y que se estudie de forma más profunda el efecto de la orientación de las fibras en el fallo de los compuestos con refuerzo unidireccional de lino y esparto.

A pesar de los problemas de composición y modos de fallo descritos hasta este punto, todas las muestras con refuerzo unidireccional de esparto ofrecen unas propiedades muy elevadas en términos de rigidez y tensión máxima. Por ello se espera que los resultados ofrecidos en este proyecto consigan motivar investigaciones relacionadas con materiales compuestos con refuerzo unidireccional de esparto.

5. PRESUPUESTO

A continuación se evalúan los costes relativos a la fabricación y ensayo de las muestras estudiadas.

Tabla 27. Coste de los materiales utilizados para la fabricación de los compuestos.

Materiales	Coste unitario	Cantidad	Coste
Cinta adhesiva	9.8€/cilindro	3cilindros	29.4€
PLA(granular)	2€/kg	0.837kg	1.674€
Papel vegetal	0.1€/unidad	154unidades	15.4€
Bobina hilo lino	4€/bobina	3bobinas	12€
Fibras lino	6€/paquete	1paquete	6€
Tejido lino	3€/m ²	0.302m ²	0.905€
Fibras esparto	6€/paquete	1paquete	6€
Coste Total	-	-	71.38€

La cantidad de PLA ha sido calculada en base a las muestras estudiadas en el trabajo, al igual que la cantidad de papel vegetal. El coste del papel vegetal es de 1€ por cada paquete de 10 unidades. La cantidad de lino tejido se ha calculado en base al área de las láminas de las muestras 9 y 10.

En cuanto a los equipos utilizados. Se han empleado dos máquinas de ensayos. Un modelo 'Servois' para ejecutar los ciclos de compresión y un modelo 'Instron' para realizar los ensayos de tracción. Para calcular los costes asociados a estos equipos sería necesario conocer el coste horario de uso de los equipos y el tiempo de uso de los equipos. El coste horario de uso de los equipos se calcula a partir del coste horario de posesión y el coste horario de operación, sin embargo no se ha podido acceder a los datos necesarios para el cálculo de dichos costes. A pesar de que no ha sido posible calcular el coste horario de estos equipos se ha realizado una estimación del tiempo de uso de las máquinas. Dicho tiempo se calcula conocido el tiempo de fabricación de cada lámina de PLA (tres minutos) y de cada muestra (dependiendo del número de componentes, cinco minutos por cada ciclo de compresión), así como el tiempo de ensayo promedio de las probetas (78segundos).

Tabla 28. Tiempo de uso de las máquinas de ensayos (compresión y ensayos de tracción).

Muestra	Tiempo Máquina Compresión (minutos)	Tiempo Máquina Ensayos de Tracción (minutos)
1	49	11.7
2	49	13
3	27	10.4
4	27	7.8
5	27	10.4
6	14	10.4
7	49	11.7
8	27	9.1
9	27	9.1
10	20	9.1
11	14	-
12	14	11.7
13	11	13
14	11	9.1

Tabla 29. Tiempo total de uso de los equipos.

Tiempo total máquina de compresión (horas)	Tiempo total máquina ensayos de tracción (horas)
6.1	2.28

En cuanto a los gastos de personal. La fabricación y ensayo de las muestras estudiadas ha requerido tres personas. La duración del trabajo ha sido de 3h/día durante 3días/semana y 3meses. Lo que resulta en 108 horas/persona, es decir 324 horas de personal. Suponiendo un coste unitario de 10€/hora.

Tabla 30. Coste total personal.

Coste Total Personal	3240€
-----------------------------	--------------

El coste total del proyecto de investigación se calcula a partir de los costes de material y los costes de personal.

Tabla 31. Coste total del proyecto de investigación.

Coste Total Proyecto	3311.38€
-----------------------------	-----------------

6. CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos tras caracterizar los materiales compuestos fabricados se pueden extraer una serie de conclusiones:

- En relación a los compuestos con refuerzo unidireccional de lino hilado industrialmente. En este proyecto se ha demostrado que es posible producir compuestos laminares con este tipo de refuerzo a través de procesos de compresión con placas calefactoras. Tanto el tiempo dispuesto como los medios disponibles para la ejecución del trabajo han impedido desarrollar un proceso de fabricación que ofreciera mejores resultados que el proceso escogido. A pesar de que el proceso escogido ha provocado diversas dificultades (distribución no uniforme de material bioplástico, pérdidas de PLA, diferencias en los productos obtenidos), ha sido posible efectuar el análisis de un conjunto de parámetros (temperatura, presión, número de láminas de refuerzo, composición teórica) para producir finalmente un material con propiedades equiparables a las de compuestos biodegradables fabricados en anteriores proyectos.
- En relación a los compuestos con refuerzo unidireccional de lino hilado manualmente. En este proyecto se ha demostrado que es posible producir compuestos laminares con este tipo de refuerzo mediante procesos de compresión con placas calefactoras. Sin embargo, la falta de medios adecuados para el hilado de las fibras de lino y la fabricación de compuestos con este refuerzo, han dado como resultado un tiempo de fabricación muy elevado y un producto heterogéneo. Motivos por los que no ha podido efectuarse un análisis más completo a cerca de este material. De haber contado con los medios adecuados para la fabricación de este compuesto probablemente se habrían obtenido resultados superiores a los reportados en este proyecto.
- En relación a los compuestos con refuerzo de lino tejido. Aparentemente no se puede aprovechar ninguna característica del proceso de fabricación de compuestos con refuerzo unidireccional de lino (desarrollado en este proyecto) para mejorar el proceso desarrollado en investigaciones previas (para la fabricación de compuestos con refuerzo de lino tejido). Esto se debe a que no se aprecian diferencias claras entre ambos procesos a las que pueda atribuirse la variación de propiedades de las muestras producidas. Además, los resultados destacan el proceso desarrollado en investigaciones previas dadas las bajas pérdidas de PLA que supone. Sería interesante hacer una comparación más profunda entre los procesos mencionados para comprobar si pueden aprovecharse características del proceso desarrollado en investigaciones previas para optimizar el proceso de fabricación de compuestos con refuerzo unidireccional escogido en este trabajo.
- En relación a los compuestos con refuerzo unidireccional de esparto. En este proyecto se ha demostrado que es posible producir compuestos laminares con este tipo de refuerzo mediante procesos de compresión con placas calefactoras. Tanto el tiempo del que se ha dispuesto para estudiar estos materiales, como los medios disponibles

no han permitido efectuar un análisis tan completo como el desarrollado para los compuestos con refuerzo unidireccional de lino. A pesar de ello, los compuestos fabricados con refuerzo unidireccional de esparto han reportado propiedades muy elevadas en términos de rigidez y tensión máxima.

7. TRABAJOS FUTUROS

Este trabajo forma parte de una investigación con objetivos más ambiciosos a los planteados en este proyecto. Por este motivo a continuación se plantean una serie de estudios que pueden resultar de utilidad para optimizar la fabricación de materiales compuestos 100% biodegradables.

- En el apartado de resultados se ha expuesto que la presencia de defectos en el utillaje de la máquina de ensayos ha supuesto una aplicación de presión no uniforme durante los ciclos de compresión. Esta es una posible causa de la distribución no homogénea de PLA en los compuestos laminares ensayados en la máquina. Además puede ser la causa de la orientación inadecuada de las fibras de los compuestos con refuerzo unidireccional. Una solución a estos defectos podría ser la instalación de un sistema de guías que garantizara el paralelismo de las placas calefactoras. De esta forma la fuerza ejercida por la máquina de ensayos se distribuiría uniformemente.
- Uno de los defectos del proceso de fabricación es la falta de medios para la correcta colocación de las láminas de PLA y de refuerzo en la máquina de ensayos antes de iniciar el ciclo de compresión. Situar las muestras en una posición diferente respecto de las placas calefactoras puede ser una de las causas de que la presión aplicada en cada ciclo de compresión sobre las muestras sea variable. Esto puede resultar en una distribución de PLA diferente en cada muestra producida. Sería muy útil diseñar un sistema de colocación de las láminas de fibra y PLA en la máquina de ensayos más preciso que garantizara que las muestras estén centradas.
- Los motivos por los que no se ha efectuado un análisis más completo acerca de los compuestos con refuerzo unidireccional de lino con hilado no industrial han sido los elevados tiempos de fabricación de este material y que la producción de estos materiales ha resultado en productos heterogéneos. El diseño de herramientas de hilado de fibras de lino podría reducir los tiempos de fabricación y permitiría producir un material más homogéneo. De esta forma sería posible realizar un análisis más completo de este material.
- Los materiales fabricados con refuerzo unidireccional de esparto han presentado un modo de fallo distinto al de los compuestos con refuerzo unidireccional de lino y al de los compuestos con refuerzo de lino tejido. Una de las causas puede ser la orientación inadecuada de las fibras de esparto. Los medios de los que se ha dispuesto para fabricar estos materiales han impedido orientar las fibras de esparto con la misma precisión con la que se han orientado las fibras de lino. El diseño de herramientas adecuadas a la elaboración de láminas de esparto permitiría producir compuestos con este tipo de refuerzo de mayor calidad.
- La falta de medios y de tiempo suficiente han impedido que el estudio acerca de los compuestos con refuerzo unidireccional de esparto sea tan completo como el efectuado para los compuestos con refuerzo unidireccional de lino. Sería interesante

realizar un análisis más completo de estos materiales para comprobar si los compuestos con este refuerzo pueden ofrecer mejores resultados. Por ejemplo realizar un análisis independiente para los parámetros de número de láminas de refuerzo y composición. Por los motivos expuestos solo ha sido posible fabricar compuestos con refuerzo unidireccional de esparto modificando los parámetros de composición y número de láminas de refuerzo simultáneamente.

- Tras la fabricación y el ensayo de los materiales estudiados en este trabajo, se advirtió que uno de los mayores defectos del proceso escogido es la elevada cantidad de residuos de PLA que este supone. Un estudio detallado de la influencia de los siguientes factores en las pérdidas de PLA, podría optimizar el proceso escogido para la fabricación de los compuestos:

- 1. Defectos en el utillaje.**

La aplicación de presión no uniforme durante los ciclos de compresión puede ser uno de los motivos por los que se producen las pérdidas de PLA. Las posibles soluciones a estos defectos ya han sido expuestas. Sería interesante comprobar si la implementación de estas mejoras reduce la cantidad de residuos.

- 2. Las características de las fibras de refuerzo escogidas.**

Las fibras escogidas podrían ser incompatibles con la matriz utilizada. Como resultado, durante los ciclos de compresión las fibras no quedarían correctamente impregnadas de PLA lo que podría resultar en un aumento de residuos. En relación a este punto, sería interesante comprobar si aplicar procesos de preimpregnado en las láminas de refuerzo reduce las pérdidas de PLA durante el proceso de compresión. No ha sido posible efectuar este análisis porque no se han tenido los medios requeridos para realizar el preimpregnado de las capas de refuerzo.

- 3. Densidad de fibras de las láminas.**

El uso de láminas con mayor densidad de fibras podría impedir las pérdidas de PLA al evitar que el material bioplástico fluyera en exceso durante el proceso de compresión. Esto además podría mejorar el impregnado de las fibras. Dado el tiempo dispuesto para la fabricación y estudio de los materiales no ha sido posible analizar este parámetro. Sin embargo, en el apartado de resultados se ha advertido la posible relación entre las pérdidas de PLA y la densidad de fibras de los compuestos con refuerzo unidireccional de lino y de esparto.

- 4. Exceso de presión en el proceso.**

Puede constituir uno de los motivos por los que se producen pérdidas de PLA. A parte de las conclusiones extraídas en el análisis de este parámetro en el capítulo de resultados (apartado de los materiales con refuerzo unidireccional de lino hilado industrialmente), no se ha contado con el tiempo suficiente para estudiar la influencia de la presión en las pérdidas de PLA del proceso.

5. Tiempo de ciclo de compresión.

Este parámetro puede estar relacionado con el impregnado de las fibras.

El tiempo de ciclo de compresión empleado en este trabajo se ha definido en base a otros proyectos previos acerca de compuestos laminares con refuerzo de lino [18, 19]. No se ha dispuesto del tiempo suficiente para analizar la influencia de este parámetro en las pérdidas de PLA durante la fabricación de compuestos con refuerzo unidireccional.

6. Número de ciclos de compresión del proceso y relación de tamaños entre las láminas de PLA y las láminas de refuerzo.

En el apartado de resultados de los compuestos con refuerzo de lino tejido, se han señalado las diferencias habidas entre los procesos escogidos para fabricar las muestras (9 y 10) en términos de pérdidas de PLA. Se desconoce el efecto que puede tener aumentar el número de ciclos de compresión del proceso, apilar láminas con dimensiones independientes o el uso de retenedores. Sin embargo ambos procesos difieren en estos parámetros. Por ello sería interesante comparar dos muestras con refuerzo de lino tejido producidas bajo los mismos parámetros de temperatura, presión, número de láminas de refuerzo y composición, pero con diferencias en la relación de tamaños, en el número de ciclos de compresión del proceso y en el uso de retenedores. De esta forma podría evaluarse el efecto de estos factores en la generación de residuos del proceso.

8. REFERENCIAS

- [1] Unión Europea - European Commission. *Medio ambiente - Unión Europea - European Commission*. [en línea] Disponible en: https://europa.eu/european-union/topics/environment_es
- [2] Vivir bien, respetando los límites de nuestro planeta. VII PMA – Programa General de Acción de la Unión en materia de Medio Ambiente hasta 2020. [editor] Oficina de Publicaciones de la Unión Europea, pp.1-4. Disponible en: https://europa.eu/european-union/topics/environment_es
- [3] Faruk, O., Bledzki, A., Fink, H. y Sain, M. (2012). Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010. *Progress in Polymer Science*, 37(11), pp.1552-1596.
- [4] Le Duigou, A., Pillin, I., Bourmaud, A., Davies, P. y Baley, C. (2008). Effect of recycling on mechanical behaviour of biocompostable flax/poly(l-lactide) composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 39(9), pp.1471-1478.
- [5] Vaneko.com. *Van.Eko About*. [en línea] Disponible en: <https://www.vaneko.com/about/>
- [6] Melones, R. *Análisis: raqueta Artengo TR 890 Flax Fiber - Blog Tennis Decathlon*. [en línea] Blog Tennis Decathlon. Disponible en: <http://blog.tenis.decathlon.es/analisis-raqueta-artengo-tr-890-flax-fiber/>
- [7] Blackbird Guitars. *EL CAPITAN*. [en línea] Disponible en: <https://www.blackbirdguitar.com/products/el-capitan>
- [8] Bodros, E., Pillin, I., Montrelay, N. y Baley, C. (2007). Could biopolymers reinforced by randomly scattered flax fibre be used in structural applications?. *Composites Science and Technology*, 67(3-4), pp.462-470.
- [9] Rubio López, A. (2014). *Predicción del comportamiento frente a impactos de estructuras de materiales compuestos biodegradables*. Licenciatura. Universidad Carlos III de Madrid.
- [10] Jones, R. (1975). *Mechanics of composite materials*.
- [11] Miravete, A., Castejón, L., Clemente, R., Jiménez, M., Lizaranzu, M., Cuartero, J., Revuelta, D., Millán, C., Gómez, V., Calvo, J., Tolosana, N., Peralta, J. y Larrodé, E. (2007). *Materiales Compuestos I*.
- [12] Bledzki, A., Reihmane, S. y Gassan, J. (1996). Properties and modification methods for vegetable fibers for natural fiber composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 59(8), pp.1329-1336.
- [13] Velásquez Restrepo, S., Pelaéz Arroyave, G. y Giraldo Vásquez, D. (2016). Uso de fibras vegetales en materiales compuestos de matriz polimérica: una revisión con miras a su aplicación en el diseño de nuevos productos. *Informador Técnico*. 80, pp.77-86.
- [14] Akil, H., Omar, M., Mazuki, A., Safiee, S., Ishak, Z. y Abu Bakar, A. (2011). Kenaf fiber reinforced composites: A review. *Materials & Design*, 32(8-9), pp.4107-4121.

- [15] Le Duigou, A., Davies, P. y Baley, C. (2011). Environmental Impact Analysis of the Production of Flax Fibres to be Used as Composite Material Reinforcement. *Journal of Biobased Materials and Bioenergy*, 5(1), pp.153-165.
- [16] Satyanarayana, K., Arizaga, G. y Wypych, F. (2009). Biodegradable composites based on lignocellulosic fibers—An overview. *Progress in Polymer Science*, 34(9), pp.982-1021.
- [17] Koronis, G., Silva, A. y Fontul, M. (2013). Green composites: A review of adequate materials for automotive applications. *Composites Part B: Engineering*, 44(1), pp.120-127.
- [18] Hoang Hoang, V. (2017). *Characterization and impact study of flax/PLA biocomposites for aerospace-oriented applications*. Licenciatura. Universidad Carlos III de Madrid.
- [19] Rubio López, A. (2016). *Manufacturing, Characterization and Modelling of Biodegradable Composite Materials*. Máster. Universidad Carlos III de Madrid.
- [20] Dittenber, D. y GangaRao, H. (2012). Critical review of recent publications on use of natural composites in infrastructure. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 43(8), pp.1419-1429.
- [21] Araújo, J., Waldman, W. y De Paoli, M. (2008). Thermal properties of high density polyethylene composites with natural fibres: Coupling agent effect. *Polymer Degradation and Stability*, 93(10), pp.1770-1775.
- [22] Porras, A. y Maranon, A. (2012). Development and characterization of a laminate composite material from polylactic acid (PLA) and woven bamboo fabric. *Composites Part B: Engineering*, 43(7), pp.2782-2788.
- [23] WS Hampshire Inc. *Mechanical properties of Polyethylene*. [en línea] Disponible en: http://www.wshampshire.com/pdf/psg_uhmw_polyethylene.pdf
- [24] Efunda.com. (2017). *eFunda Polymers: Properties of Polyester (thermoplastic) {poly(butylene-terephthalate), Unfilled}*. [en línea] Disponible en: http://www.efunda.com/materials/polymers/properties/polymer_datasheet.cfm?MajorID=P-TP&MinorID=1
- [25] Plastics.ulprospector.com. *Epoxy Typical Properties Generic Epoxy | UL Prospector*. [en línea] Disponible en: <https://plastics.ulprospector.com/generics/13/c/t/epoxy-properties-processing>
- [26] Alibaba.com. *Buy Pure chitosan in China on Alibaba.com*. [en línea] Disponible en: https://www.alibaba.com/cache/Pure-chitosan_626961165.html
- [27] Alibaba.com. *Buy epoxy resin in China on Alibaba.com*. [en línea] Disponible en: https://www.alibaba.com/cache/epoxy-resin_983523321.html
- [28] La Mantia, F. y Morreale, M. (2011). Green composites: A brief review. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 42(6), pp.579-588.

- [29] Miravete, A., Castejón, L., Clemente, R., Jiménez, M., Lizaranzu, M., Cuartero, J., Revuelta, D., Millán, C., Gómez, V., Calvo, J., Tolosana, N., Peralta, J. y Larrodé, E. (2007). *Materiales Compuestos II*.
- [30] Bax, B. y Müssig, J. (2008). Impact and tensile properties of PLA/Cordenka and PLA/flax composites. *Composites Science and Technology*, 68(7-8), pp.1601-1607.
- [31] Plackett, D., Løgstrup Andersen, T., Batsberg Pedersen, W. y Nielsen, L. (2003). Biodegradable composites based on l-poly lactide and jute fibres. *Composites Science and Technology*, 63(9), pp.1287-1296.
- [32] Servosis.com. *Desarrollo y Fabricación de Máquinas de Ensayo | Servosis*. [en línea] Disponible en: <http://www.servosis.com/>
- [33] Baets, J., Plastria, D., Ivens, J. y Verpoest, I. *Determination of the optimal flax fibre preparation for use in UD flax - epoxy composites*. [en línea] Disponible en: <https://lirias.kuleuven.be/bitstream/123456789/351782/3/pub06149.pdf>
- [34] Goutianos, S., Peijs, T., Nystrom, B. y Skrifvars, M. (2006). Development of Flax Fibre based Textile Reinforcements for Composite Applications. *Applied Composite Materials*, 13(4), pp.199-215.
- [35] Fernández Palazón, G. Aspectos socioeconomicos de la explotacion del esparto en España. [en línea] Raco.cat. Disponible en: <http://www.raco.cat/index.php/RevistaGeografia/article/viewFile/45886/56678>
- [36] Delgado, M., Espinach, F., Julián, F., Pelach, M., Méndez, J., Vilaseca, F. and Mutjé, P. *DESARROLLO DE MATERIALES COMPUESTOS, COMPLETAMENTE BIODEGRADABLES, A PARTIR DE ALMIDÓN TERMOPLÁSTICO Y FIBRAS SEMIQUÍMICAS DE ESPARTO..* [en línea] Disponible en: https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/42023184/DESARROLLO_DE_MATERIAL_ES_COMPUESTOS_COMP20160203-24379-1i157ki.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAIWOWYYGZ2Y53UL3A&Expires=1506019096&Signature=PQGrxJdc4Kcq4WVA0ssfwgsJ8CU%3D&response-content-disposition=inline%3B%20filename%3DDESARROLLO_DE_MATERIALES_COMP.pdf
- [37] Mse.mtu.edu. *Fibre Orientation and Strength (1)*. [en línea] Disponible en: <http://www.mse.mtu.edu/~drjohn/my4150/class4/os1.html>



Universidad
Carlos III de Madrid